WIADOMOSCI
TECHNICZNO-ARTYLERYJSKIE

Nr. 9.

KWIECIEŃ — 1931.

UWAGA: Liczby, umieszczone nad tytułami poszczególnych artykułów w tekście, oznaczają symbole klasyfikacji dziesiętnej.

539.4:623.42

Prof. dr. M. T. HUBER

Z TEORJI SAMOWZMACNIANIA LUF DZIAŁOWYCH.

Wstęp.

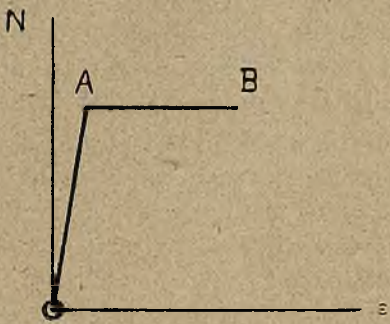
Praca niniejsza jest próbą zastosowania nowoczesnej teorji odkształceń plastycznych do rozwiązania zagadnienia t. zw. *samowzmacniania* [1]) w sposób bardziej zadowalający od rozwiązań dotychczasowych. Albowiem znane mi próby rozwiązania teoretycznego posiadają pewne braki i opierają się na założeniach niedostatecznie uzasadnionych. Od wad tych nie jest bynajmniej wolną ceniona i rozpowszechniona w piśmiennictwie techniczno-artyleryjskiem francuskiem i naszem teorja M. Malaval'a, której to teorji autor przytoczonego właśnie polskiego dzieła poświęca dużo miejsca. Teorja Malaval'a daje pozornie więcej aniżeli teoretyczny schemat ciała doskonale *elasto-plastycznego,* t. j. takiego, dla którego wykres naprężeń i wydłużeń jednostkowych składa się z prostej OA (rys. 1), wychodzącej z początku spółrzędnych i sięgającej do *granicy plastyczności* [2]) A oraz prostej AB równoległej do osi wydłużeń ε.

---

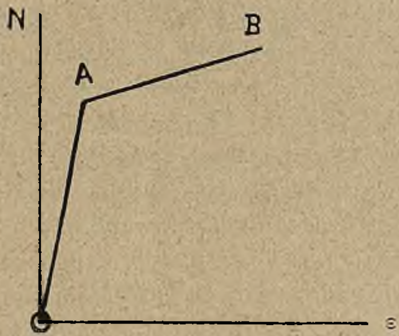
[1]) Termin odpowiadający francuskiemu „autofrettage", wprowadzony w dziele: *„Wytrzymałość luf działowych"*, opracował ppłk. inż. Kazimierz Jakowski, Bibl. „Przeglądu Artyleryjskiego" Nr. 5, Warszawa, 1929. Powołując się w ciągu dalszym na tę książkę będziemy używali skrótu: „Wytrz. luf dz.".

[2]) Termin ten oddaje najlepiej to, co Anglicy nazywają *Yield point,* Francuzi *limite d'élasticité apparente*, a Niemcy *Fliessgrenze*, albo *Streckgrenze.* U nas niestety co kilka lat proponuje się nową nazwę. W ubiegłem stuleciu dość długo trzymała się „granica *płynności*", lub „granica *płynięcia*", potem Komitet Redakcyjny „Technika" przyjął niezbyt szczęśliwą „granicę *ciastowatości*". Około 10 lat temu wprowadziłem w moich pracach, za radą ś. p. prof. Mierzejewskiego i innych członków Komisji, zwołanej w swoim czasie przez P. K. N., termin granica *plastyczności,* tak że niedawno zaskoczył mnie poprostu nowy termin „granica

Najpoważniejszy zarzut, jaki można postawić teorji Malaval'a, dotyczy zupełnego zaniedbania naprężeń podłużnych w rurze poddanej ciśnieniu wewnętrznemu, które zwłaszcza w stadjum odkształceń plastycznych osiągają, jak zobaczymy, wartości bardzo znaczne i muszą grać doniosłą rolę. Francuski inżynier artyleryjski rozpatruje rów-



Rys. 1.
Wykres rozciągania materjału doskonale elasto-plastycznego.



Rys. 2.
Wykres rozciągania według schematu Malaval'a.

nowagę elementu rury w stanie plastycznym tak, jak gdyby działały tylko naprężenia obwodowe T i radjalne P (Por. str. 56 i następne w Wytrz. luf dz.). Na tej podstawie dochodzi do równania

$$E = a + b \frac{c}{r^2},$$

określającego „granicę sprężystości" E materjału rury w cylindrycznej warstewce elementarnej jako funkcję promienia r tej warstewki, przyczem a, b, c oznaczają stałe zależne od własności wytrzymałościowych materjału. Stałe te wyznacza Malaval na podstawie wykresu N, ε uproszczonego do schematu (rys. 2) złożonego również z dwu prostych, ale różniącego się od poprzedniego wyraźnem nachyleniem prostej stanu plastycznego do osi wydłużeń ε.

Dlatego to możnaby mniemać, że schemat ten odpowiada lepiej rzeczywistości od poprzedniego, który będzie stanowił podstawę na-

---

podatności" wprowadzony do piśmiennictwa wojskowego. Nie wiem kto jest autorem tego pomysłu, ale niepodobna uznać go za szczęśliwy, albowiem wyraz „podatność" ma w naszym języku oddawna utarte znaczenie *zdolności ciała do odkształceń wogóle*, a więc nietylko plastycznych; wyraz ten nie nadaje się przeto na oznaczenie punktu przełomu od odkształceń sprężystych do odkształceń trwałych czyli plastycznych. Wszak mówimy często o sprężynach mniej lub więcej podatnych zależnie od tego, czy się mniej lub więcej uginają (sprężyście) pod danem obciążeniem.

szych wywodów teoretycznych. Tymczasem rzecz się ma przeciwnie, jeżeli idzie o materjały mające wyraźną granicę plastyczności, albowiem wzniesienie się doświadczalnej linji wykresu poza punktem A zachodzi dopiero po dość znacznem odkształceniu plastycznem, większem od tego, jakie wystarcza do samowzmocnienia rury stalowej na początku osiągnięcia stanu plastycznego w całej jej grubości. Krótko mówiąc, korzystamy w teorji samowzmocnienia tylko z krótkiego odcinka linji wykresu w stadjum odkształceń plastycznych, a odcinek ten zbliża się raczej do prostej równoległej do osi wydłużeń, aniżeli do prostej nachylonej, jak przyjmuje Malaval [3])

Inaczej ma się rzecz gdy idzie o odkształcenia bardzo znaczne. Wówczas zachodzi komplikacja dwojaka: jedna spowodowana zjawiskiem *twardnienia* (zwanem po francusku *„écrouissage"*, a po niemiecku *„Verfestigung"*); druga zaś tkwi w trudnościach matematycznych operowania odkształceniami skończonemi.

Zjawisko twardnienia charakteryzuje się podniesieniem linji wykresu N, ε począwszy od pewnego punktu C na linji poziomej AB (rys. 3) odkształceń plastycznych. Temu podniesieniu towarzyszy zmiana własności wytrzymałościowych materjału pręta rozciąganego, objawiająca się przy powtórnem jego obciążeniu podwyższeniem granicy plastyczności, czyli praktycznej „granicy sprężystości". Materjał

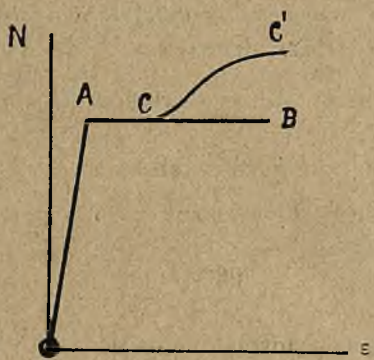
---

[3]) W dyskusji, jaka się wywiązała w Warszawskiem Towarzystwie Politechnicznem 6 grudnia 1930 r. po referacie z niniejszej pracy, p. ppłk. Jakowski zakwestjonował powyższy zarzut, zaznaczając, że w nowszych pracach Malaval'a jest mowa o naprężeniach podłużnych. Malaval dowiódł nawet doświadczalnie, że takie naprężenia zachodzą w warstwie wewnętrznej lufy samowzmocnionej i że mogą osiągnąć znaczne wartości.

Otóż dla uniknięcia wszelkich nieporozumień wypada podnieść, że wymieniony zarzut odnosi się jedynie do tych wywodów teoretycznych Malaval'a, które przedstawił szczegółowo p. ppłk. Jakowski na str. 56 do 59 „Wytrz. luf dział.". Te wywody polegają na rozpatrywaniu działania samych tylko naprężeń radjalnych obwodowych. Ich wnioskiem głównym jest wzór $E = a + b\frac{c}{r^2}$ stosowany następnie na str. 153 i dalszych do teorji samowzmocnienia, coprawda z zastrzeżeniem uwidocznionem na str. 155, że przy odkształceniach jednostkowych większych od 0,03 ustaje ważność tego wzoru.

Przy całym szacunku dla ogromnej pracy włożonej w studja i doświadczenia p. Malaval'a, oraz uznaniu jej trwałej wartości techniczno-naukowej nie można zamykać oczu na słabe strony niektórych wywodów teoretycznych jak powyższe, zwłaszcza, gdy można im przeciwstawić teorję pod pewnym względem doskonalszą. Teorja np. poniżej stosowana prowadzi do wzorów (36) na naprężenia pozostałe w lufie po operacji samowzmocnienia „drugiem ciśnieniem krytycznem". Z trzeciego z tych wzorów, określającego wartość naprężenia podłużnego S widać wyraźnie, że przy stosowaniu dużej wartości stosunku $R_1 : R_0$ stają się te naprężenia ciśnieniami. Ciśnienia te mogą być bardzo znaczne i maleją ze wzrostem promienia warstwy r, podobnie jak ciśnienia radjalne, zgodnie z przytoczonemi w dyskusji doświadczeniami Malaval'a.

staje się nieco twardszym (stąd nazwa „twardnienia") i, co zatem idzie, bardziej kruchym. Terminologja w tej dziedzinie jest, zwłaszcza u nas, jeszcze bardzo chaotyczna. Pochodzi to stąd, że odnośne własności metali interesują kilka różnych grup specjalistów. Technolog mechaniczny np. zajmujący się obróbką metali zna powyższe zjawisko oddawna jako skutek *zimnej obróbki* i nazywa je przeto w przenośni „zimną obróbką". Szukając krótszej nazwy, charakteryzującej lepiej zjawisko twardnienia wskutek odkształceń plastycznych metali, wprowadził ś. p. St. Anczyc do naszego piśmiennictwa wyraz *„zgniot"* przyjęty potem w pracach profesorów W. Broniewskiego, I. Feszczenko-Czopiwskiego i innych autorów, pracujących w dziedzinie technologji metali. Nie



Rys. 3.
Schemat rzeczywistego wykresu rozciągania.

uważam tej nazwy za szczęśliwą, albowiem charakteryzuje rzecz zbyt jednostronnie. Wszak to samo zjawisko występuje równie dobrze przy zgniataniu czyli *ściskaniu*, jak przy *rozciąganiu*, a wogóle przy każdem odkształceniu plastycznem, czyli trwałem. Inżynier wytrzymałościowy znowu (jeżeli wolno mi tak nazwać pracownika w laboratorjum wytrzymałościowem) chętnie nazywa to zjawisko *wzmocnieniem*, gdyż przedewszystkiem zwraca uwagę na fakt zwiększenia doraźnej wytrzymałości metalowego pręta próbnego, jeżeli ten pręt był uprzednio rozciągnięty poza granicę plastyczności [4]). Jednakowoż nazwa „wzmocnienie" bywa używana w tylu rozmaitych znaczeniach w technice, że przydawanie jej tutaj

[4]) Jeszcze jaśniej tłumaczy pochodzenie tej nazwy wyraz *„moc"*, którego używał założyciel Mechanicznej Stacji doświadczalnej we Lwowie, prof. T. Fiedler w znaczeniu *„wytrzymałości"*.

jeszcze jednego, bardzo specjalnego, nie jest pożądane. Dlatego radbym zalecić stosowanie w tym przypadku tylko nazwy „twardnienie".

Co się tyczy trudności ujęcia matematycznego dużych odkształceń, to np. Malaval w swojej teorji samowzmacniania luf działowych zdawał sobie dobrze z nich sprawę, dążąc do pokonania tych trudności w zakresie tylko tego jedynego zagadnienia. Jednakże dotyczące wywody zawierają pewne niedomówienia lub niejasności, i dlatego pozwolę sobie dodać nieco uwag poświęconych kwestji dużych odkształceń, jakkolwiek w późniejszych rozważaniach teoretycznych, poświęconych zagadnieniu samowzmocnienia, pozostanie ta kwestja na uboczu.

Przy rozpatrywaniu odkształceń skończonych okazuje się pożytecznem określenie wielkości odkształcenia logarytmem naturalnym stosunku wielkości odkształconej np. L do wielkości pierwotnej np. l czyli $\operatorname{logn} \frac{L}{l}$, zamiast samą wartością liczbową stosunku zmiany wielkości pierwotnej do tejże wielkości, czyli $\frac{L-l}{l}$. Różnica obu sposobów określenia jest widoczna z rozwinięcia

$$\operatorname{logn} \frac{L}{l} = \operatorname{logn} \frac{l+L-l}{l} = \operatorname{logn} \left(1 + \frac{L-l}{l}\right) = \frac{L-l}{l} - \frac{1}{2}\left(\frac{L-l}{l}\right)^2 + \ldots$$

Przy bardzo małych wartościach stosunku $\frac{L-l}{l}$ staje się ta różnica wielkością małą rzędu wyższego, wobec czego stosowanie „odkształceń logarytmicznych", jak je krótko nazywać będziemy, jest zbędne. Korzyści ze stosowania odkształceń logarytmicznych wychodzą na jaw dopiero przy rozważaniu odkształceń dowolnie wielkich. Jeżeli bowiem np. długość pierwotna l dozna przyrostu Δl tak że $l + \Delta l = l_1$, a potem długość l_1 dozna przyrostu Δl_1 z wynikiem $l_2 = l_1 + \Delta l_1$, to odpowiednie wydłużenia jednostkowe są

$$\frac{\Delta l}{l} \text{ i } \frac{\Delta l_1}{l_1}.$$

Jednakże suma tych wydłużeń jednostkowych częściowych $\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l_1}{l_1}$ nie daje wydłużenia jednostkowego końcowego, albowiem to ostatnie równa się

$$\frac{\Delta l + \Delta l_1}{l}.$$

Różnica obu tych wielkości

$$\frac{\Delta l + \Delta l_1}{l} - \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l_1}{l_1}\right) = \frac{\Delta l_1}{l}\left(1 - \frac{l}{l_1}\right),$$

co nie jest równe zeru.

Tymczasem widać odrazu, że

$$\frac{l_2}{l} = \frac{l_1}{l} \cdot \frac{l_2}{l_1},$$

a więc

$$\operatorname{logn} \frac{l_2}{l} = \operatorname{logn} \frac{l_1}{l} + \operatorname{logn} \frac{l_2}{l_1},$$

czyli że *odkształcenie logarytmiczne końcowe jest dokładnie sumą odkształceń logarytmicznych częściowych.*

Rozpatrując teraz odkształcenia prostopadłościanu o krawędziach a, b, c, który się zmienił na prostopadłościan o krawędziach

$$a_1 = a(1 + \varepsilon_1), \quad b_1 = b(1 + \varepsilon_2), \quad c_1 = c(1 + \varepsilon_3)$$

otrzymujemy jako ścisłe wyrażenie względnej zmiany objętości:

$$\frac{a_1 b_1 c_1 - abc}{abc} = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) - 1 =$$

$$= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + (\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1) + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3$$

zamiast stosowanego zwykle w teorji sprężystości *przybliżenia:*

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3,$$

tymczasem równanie ścisłe

$$\frac{a_1 b_1 c_1}{abc} = \frac{V_1}{V},$$

daje po zlogarytmowaniu

$$\operatorname{logn} \frac{V_1}{V} = \operatorname{logn} \frac{a_1}{a} + \operatorname{logn} \frac{b_1}{b} + \operatorname{logn} \frac{c_1}{c},$$

z czego widać, że *logarytmiczne względne odkształcenie objętościowe jest ściśle równe sumie odkształceń względnych logarytmicznych w trzech kierunkach wzajemnie prostopadłych*[5]).

---

[5]) Mierzenie odkształcenia zapomocą „odkształceń logarytmicznych" bywa interpretowane niekiedy w sposób następujący:

„Jeżeli chcemy określić teoretyczną wartość wydłużenia jednostkowego, to musimy w każdej chwili odnosić przyrost elementarny Δl do długości rzeczywistej l, którą w tej chwili pręt posiada (a nie do wartości pierwotnej l_0), a w takim razie musimy odmierzać na osi odciętych poszczególne wartości $\frac{\Delta l}{l}$ jedne za drugiemi; odcięta całkowita będzie zatem wynosiła

$$\int_{l_0}^{l_1} \frac{\Delta l}{l} = \operatorname{logn} \frac{l_1}{l_0} = \left(\frac{l_1}{l_0} - 1\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{l_1}{l_0} - 1\right)^2 + \ldots$$

Przy odkształceniach trwałych metali plastycznych nie zachodzi, jak poucza doświadczenie, godna uwzględnienia zmiana objętości. (Taka zmiana zachodzi, jak wiadomo, przy odkształceniach sprężystych). Dlatego dla odkształceń trwałych określonych głównemi wydłużeniami jednostkowemi zwykłemi ε_1, ε_2, ε_3, lub takiemiż wydłużeniami logarytmicznemi $\bar{\varepsilon}_1$, $\bar{\varepsilon}_2$, $\bar{\varepsilon}_3$, możemy napisać wogóle ściśle:

$$\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 + \bar{\varepsilon}_3 = 0,$$

albo

$$\operatorname{logn}(1 + \varepsilon_1) + \operatorname{logn}(1 + \varepsilon_2) + \operatorname{logn}(1 + \varepsilon_3) = 0,$$

a w przybliżeniu wystarczającem w przypadku odkształceń małych

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0.$$

Po tych uwagach przejdziemy do tematu właściwego pracy niniejszej, rozpoczynając od przytoczenia pewnych wyników oddawna

---

Gdy $\left(\frac{l_1}{l_0} - 1\right)$ jest bardzo małe, to można poprzestać na pierwszym wyrazie powyższego rozwinięcia"...

Otóż rozumowanie powyższe nie może stanowić dowodu, że „teoretyczną wartością" wydłużenia jednostkowego jest raczej $\operatorname{logn} \frac{l_1}{l_0}$ niż $\frac{l_1}{l_0} - 1$.

Matematycznie jest oczywiście w porządku równanie:

$$\text{a)} \qquad \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \operatorname{logn} \frac{l_1}{l_0},$$

lecz ono nie wyraża nic więcej, jak tylko stwierdzenie stanu następującego:

Całkowity bezwzględny przyrost $l_1 - l_0$ długości pierwotnej l_0 jest niewątpliwie sumą przyrostów następujących

$$(x_1 - l_0) + (x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + \ldots + (x_n - x_{n-1}) + (l_1 - x_n)$$

jeżeli

$$l_0 < x_1 < x_2 < \ldots < x_{n-1} < x_n < l_1$$

Tymczasem całkowity względny przyrost długości

$$\frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{l_1}{l_0} - 1,$$

nie jest widocznie identyczny z sumą względnych przyrostów częściowych, t. j.

$$\frac{x_1 - l_0}{l_0} + \frac{x_2 - x_1}{x_1} + \frac{x_3 - x_2}{x_2} + \ldots + \frac{l_1 - x_n}{x_n},$$

jak również z granicą tej sumy przy $n \longrightarrow \infty$ wyrażoną wzorem (a).

Nic nas nie zmusza do nadawania wyrażeniu $\operatorname{logn} \frac{l_1}{l_0}$ jakiegoś lepiej teoretycznie uzasadnionego znaczenia fizykalnego od wyrażenia $\frac{l_1 - l_0}{l_0}$ jako miary wydłużenia jednostkowego. Jedyna racja stosowania miary logarytmicznej ma charakter praktyczno-matematyczny i daje korzyści tylko przy odkształceniach bardzo wielkich. Stosowanie jej przy odkształceniach nie przewyższających paru procent komplikuje ogromnie rachunki, zupełnie bez potrzeby.

znanych dla ułatwienia czytelnikom orjentacji w wywodach następnych i oświetlenia znaczenia tych wyników w teorji wytrzymałości i samowzmocnienia rur pod ciśnieniem wewnętrznem.

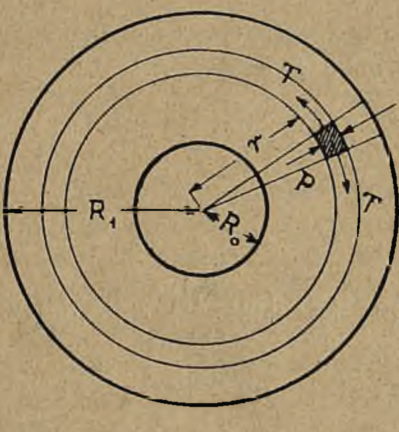
1. Odkształcenia i naprężenia sprężyste.

Przy założeniu ważności prawa Hooke'a dla odkształceń bardzo małych, określają je znane wzory, wynikające z rozwiązania Lamé'go odnośnego zagadnienia teorji sprężystości [6]). Zestawimy je tutaj dla dwu głównych przypadków obciążenia rury grubościennej ciśnieniem wewnętrznem p kg/cm²:

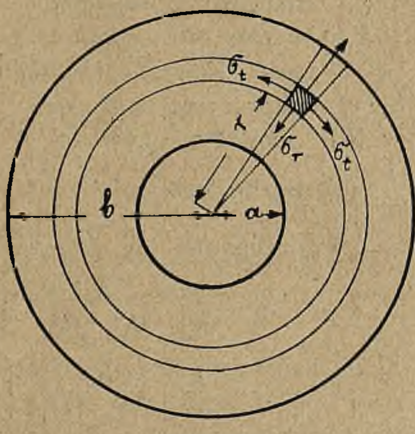
a) rura zamknięta,

b) rura otwarta.

Przypadek (a) odpowiada działaniu gazów prochowych przy strzale, zanim pocisk opuści lufę; albo działaniu ciśnienia prasy hydraulicznej przy operacji samowzmacniania przez zwiększenie ciśnienia wewnętrznego ponad *pierwszą wartość krytyczną* (p_{kr}). Tak nazwiemy wartość ciśnienia odpowiadającą zapoczątkowaniu stanu plastycznego na wewnętrznej powierzchni lufy lub rury wogóle.



Rys. 4-a.



Rys. 4-b.

Przypadek (b) zachodzi w przybliżeniu przy operacji samowzmacniania zapomocą trzpienia rozpychającego (t. zw. „dornia").

Dla ułatwienia porównania wyników niniejszej pracy z teorją

6) Por. np. pierwsze ustępy z „Wytrz. luf dz.", albo w książkach: Timoszenko-Huber, Kurs wytrzymałości materjałów, Lwów—Warszawa 1921, Książnica-Atlas, str. 247 i następne; H. Jewniewicz, Teorja sprężystości, Warszawa 1910, str. 207 i następne.

M. Malaval'a przedstawioną obszernie w „Wytrz. luf dz." ppłk. inż. K. Jakowskiego, zastosujemy przeważnie oznaczenia identyczne, notując tu i owdzie w nawiasach oznaczenia używane przez autora przy opracowaniu rozdziału o sprężystości i wytrzymałości w „Podręczniku Inżynierskim" prof. St. B r y ł y [7]) (tom II, Lwów-Warszawa 1928, nakładem Księgarni Polskiej B. Połonieckiego). Oto najważniejsze z nich uwidocznione także po części na rys. 4a i 4b [8]):

R_0 (a) pierwotny promień wewnętrzny.
R_1 (b) „ „ zewnętrzny.
r „ „ dowolnego punktu przekroju rury.
u przesunięcie (radjalne) tego punktu wskutek odkształcenia sprężystego.
$\varepsilon_t = \frac{u}{r}$ wydłużenie jednostkowe w kierunku obwodu (prostopadł. do r)
$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$ wydłużenie jednostkowe radjalne (w kierunku promienia r)
ε_l wydłużenie jednostkowe w kierunku osi rury (prostopadłe do obu tamtych.
p ciśnienie *wewnętrzne.*
T (σ_t) naprężenie *obwodowe.*
$-P$ (σ_r) naprężenie *radjalne* (P oznacza oczywiście bezwzględną wartość ciśnienia głównego w kierunku promienia r).
S (σ_l) naprężenie *podłużne.*
M (E) moduł sprężystości,
$\frac{1}{m}$ (μ) liczba Poisson'a.

W przypadku (a) mamy:

$$u = \frac{p}{M} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \left[(1 - 2\mu) r + (1 + \mu) \frac{R_1^2}{r}\right] \quad . \quad . \quad . \quad (1a)$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{p}{M} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \left[1 - 2\mu + (1 + \mu) \frac{R_1^2}{r^2}\right], \\ \varepsilon_r &= \;\text{„} \qquad \text{„} \quad \left[1 - 2\mu - (1 + \mu) \frac{R_1^2}{r^2}\right], \\ \varepsilon_l &= \;\text{„} \qquad \text{„} \quad (1 - 2\mu) \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad (2a)$$

---

[7]) Oznaczeniami temi posługuje się także „Statyka budowli" prof. St. B r y ł y (Lwów i Warszawa 1925) oraz „Mechanika budowli" prof. W. W i e r z b i c k i e g o (Warszawa 1929).

[8]) Rys. 4a zawiera znakowanie z *Wytrz. luf dz.* ze zmianą r. zamiast R na oznaczenie dowolnego promienia walcowej warstewki elementarnej. Rys. 4b odpowiada znakowaniu autora.

(Stąd łatwo znaleźć związek $\varepsilon_t + \varepsilon_r + \varepsilon_l = 3\,\varepsilon_l$ z którego później skorzystamy).

$$T = p.\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1\right), \qquad \sigma_t = p.\frac{a^2}{b^2 - a^2}\left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right)$$

$$P = p.\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right), \qquad \sigma_r = p.\frac{a^2}{b^2 - a^2}\left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) \qquad (3a)$$

$$S = p.\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}, \quad \text{albo} \quad \sigma_l = p.\frac{a^2}{b^2 - a^2}$$

Wzory powyższe są ważne, biorąc ściśle, do *granicy proporcjonalności*, ze znacznem zaś przybliżeniem do *granicy plastyczności* materjału rury. Przypadek ogólniejszy jednoczesnego działania ciśnienia wewnętrznego p_0 i zewnętrznego p_1 załatwia się najprościej przez superpozycję tego rozwiązania dla $p = p_0 - p_1$ z rozwiązaniem prostego zadania wszechstronnego ściskania materjału rury ciśnieniem p_1, które wywołuje oczywiście stan napięcia:

$$T_1 = -P_1 = S_1 = -p_1 \text{ (albo } \sigma_t' = \sigma_r' = \sigma_l' = -p_1).$$

Odpowiedni stan odkształcenia określą wzory:

$$\varepsilon_t' = \varepsilon_r' = \varepsilon_l' = -\frac{p_1}{M}(1 - 2\mu),$$

$$u_1 = -\frac{p_1}{M}(1 - 2\mu)\,r.$$

Otrzymane przez sumowanie wzory rozwiązania ogólniejszego są widocznie ważne także w przypadku, gdy $p_0 - p_1$ staje się ujemnem, byle grubość ściany była dostatecznie wielka, aby stateczność okrągłej postaci przekroju pod wpływem nadwyżki ciśnienia zewnętrznego była zapewniona.

Jeżeli z próby rozrywania pręta próbnego z materjału rury znajdziemy K jako wartość naprężenia na granicy plastyczności, to warunek wyrażający nieprzekroczenie tej granicy w materjale rury ma postać

$$N_{\text{red}} \leqslant K$$

(albo przy innych oznaczeniach $\sigma_{\text{red}} \leqslant K$).

Tutaj oznacza N_{red} (albo σ_{red}) naprężenie *sprowadzone* (zredukowane), także naprężenie „zastępcze“, którego postać jest funkcją wszystkich składowych rozpatrywanego złożonego stanu napięcia. Postać tej funkcji określają, jak wiadomo, hipotezy wytrzymałościowe. Z pośród hipotez stosowanych w rozwoju historycznym nauki o wy-

trzymałości, okazała najlepszą zgodność z wynikami badań doświadczalnych minionego dziesięciolecia nad metalami niekruchemi, hipoteza *energji postaciowej*, jak ją w skróceniu nazywać będziemy [9]).

Dawna hipoteza Coulomb'a stosowana w ostatnich latach oficjalnie w obliczeniach wytrzymałościowych artylerji francuskiej pod wpływem prac M. Malaval'a ustępuje tamtej tylko niewiele, tak iż w tych przypadkach (bardzo zresztą nielicznych), w których prowadzi do prostszych wzorów obliczeniowych, można ją również zalecić. Natomiast rozpowszechnione doniedawna hipotezy największego naprężenia lub największego wydłużenia jednostkowego mają już tylko znaczenie historyczne, a wzory na nich oparte należy rugować z podręczników praktycznych jako niepotrzebny balast [10]).

Hipoteza energji postaciowej prowadzi w naszem zagadnieniu do wzoru:

$$N^2_{red} = T^2 + P^2 + S^2 + PT + PS - ST, \quad . \; . \; . \; . \; . \qquad (4)$$

który przy znakowaniu Podręczn. Inż. przedstawia się w postaci:

$$\sigma^2_{red} = \sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_l^2 - \sigma_r \sigma_t - \sigma_l \sigma_r - \sigma_t \sigma_l, \quad . \; . \; . \qquad (4')$$

łatwej do spamiętania. Po podstawieniu wartości (3) mamy więc:

$$N_{red} = \sqrt{3}\frac{R_1^2}{r^2} \cdot \frac{R_0^2 p}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad (5a)$$

Hipoteza różnicy (algebraicznej) naprężeń głównych, t. j. hipoteza Coulomb'a, wymaga wyszukania tej różnicy, która ma największą wartość bezwzględną. Ze wzorów (3) widać, że

$$-P < S < T, \quad (\text{albo } \sigma_r < \sigma_l < \sigma_t),$$

że zatem największą różnicą jest $(P + T)$ (albo $\sigma_t - \sigma_r$).

Wobec tego

$$N_{red} = P + T \quad (\text{albo } \sigma_{red} = \sigma_t - \sigma_r), \quad . \; . \; . \qquad (4, C)$$

a po wstawieniu wartości (3),

$$N_{red} = 2\frac{R_1^2}{r^2} \cdot \frac{R_0^2 r}{R_1^2 - R_0^2} \left(\text{albo } \sigma_{red} = 2\frac{b^2}{r^2}\frac{a^2 p}{b^2 - a^2}\right) \quad . \qquad (5a, C)$$

---

[9]) Por. autora: *„Nowoczesne wzory wytrzymałości złożonej"* w Sprawozdaniu Kwartalnem Inst. Badań Techn. Lotnictwa. Warszawa 1930 r.

[10]) Por. także uwagi w następujących artykułach autora:

„O wytrzymałości rury walcowej na wewnętrzne ciśnienie hydrostatyczne". Warszawa. Technika cieplna 1927, Nr. 2.

„Jakim wzorem wytrzymałościowym należy obliczać wałki". Przegląd Techniczny, 1928. Nr. 26.

„Zagadnienia wytrzymałościowe nowoczesnej konstrukcji maszyn". Przegląd Techniczny, 1929.

A zatem mamy tutaj do czynienia z przypadkiem interesującym i wskazującym na bliskie pokrewieństwo obu hipotez; mianowicie wartości naprężenia sprowadzonego, obliczone z nich, różnią się jedynie czynnikiem stałym. Ten czynnik ma wartość $\sqrt{3} = 1,732$, przy zastosowaniu hipotezy energji postaciowej, zaś 2 na podstawie hipotezy Coulomb'a. Różnica względna obu wartości, nie dochodząca 13% większej z nich, jest niemal tego samego rzędu, co niepewność w pomiarze K, z doświadczeń na próbkach wyciętych z różnych miejsc rury.

Z obu wzorów (5a) i (5a C) widać nadto, że N_{red} przyjmuje największą wartość dla $r = R_0$, czyli na wewnętrznej powierzchni rury. A zatem pierwsze ciśnienie krytyczne p_{kr} obliczymy podstawiając w tych wzorach $r = R_0$, $N_{red} = K$ i rozwiązując je względem p. Mamy więc:

$$p_{kr} = \left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right)\frac{K}{\sqrt{3}}, \quad \left[\text{albo } p_{kr} = \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)\frac{K}{\sqrt{3}}\right] \quad . \quad . \quad (6a)$$

według hipotezy energji postaciowej, a

$$p_{kr} = \left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right)\frac{K}{2}, \quad \left[\text{albo } p_{kr} = \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)\frac{K}{2}\right] \quad . \quad (6a, C)$$

według hipotezy Coulomb'a.

Jak widzimy, ciśnienie krytyczne według hipotezy energji postaciowej wypada większe w stosunku $\frac{1}{\sqrt{3}} : \frac{1}{2} = 1,155$ czyli o 15,5 od ciśnienia krytycznego odpowiadającego hipotezie Coulomb'a.

W przypadku (b) znajdujemy:

$$u = \frac{p}{M} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left[(1-\mu)r + (1+\mu)\frac{R_1^2}{r}\right], \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1, b)$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{p}{M} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left[1 - \mu + (1+\mu)\frac{R_1^2}{r^2}\right], \\ \varepsilon_r &= \frac{p}{M} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left[1 - \mu - (1+\mu)\frac{R_1^2}{r^2}\right], \\ \varepsilon_l &= -2\mu \cdot \frac{p}{M} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}. \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad . \quad (2, b)$$

$$\left.\begin{aligned} T &= p \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1\right), \\ P &= p \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right), \\ S &= 0. \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3, b)$$

$$N_{red} = p \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \sqrt{3\frac{R_1^4}{r^4} + 1}\,, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (5, b)$$

$$N_{red} = p \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \frac{2R_1^2}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (5b, C)$$

Tutaj widzimy, że różnica wartości wytężenia[11]) według obu hipotez jest jeszcze mniejsza.

Nadto widać, że według nowej hipotezy jest wytężenie materjału w przypadku (*b*) nieco większe niż w przypadku (*a*), podczas gdy hipoteza Coulomb'a prowadzi w obu przypadkach do tej samej wartości wytężenia.

Wreszcie na pierwsze ciśnienie krytyczne otrzymujemy w naszym przypadku zamiast wzorów (6a) i (6a, C) wzory

$$p_{kr} = \left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) \frac{K}{\sqrt{3 + \frac{R_0^4}{R_1^4}}} \quad \ldots \ldots \quad (6b)$$

$$p_{kr} = \left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) \frac{K}{2}\,, \quad \ldots \ldots \quad (6b, C)$$

z których drugi (bez zmiany) odnosi się do hipotezy Coulomb'a.

2. Odkształcenia plastyczne i odpowiadające im naprężenia.

Przy wzroście ciśnienia ponad p_{kr} będzie coraz grubsza warstwa wewnętrzna poddana odkształceniu plastycznemu przy niezmiennej wartości wytężenia materjału. Zachodzi więc pytanie, jaki będzie rozkład naprężeń i odkształceń w tem stadjum.

Ażeby odpowiedzieć na to pytanie musimy wyjść ze znanego ogólnego warunku równowagi elementu rury wyrażonego równaniem:

$$T + \frac{d\,(Pr)}{dr} = 0 \quad \left[\text{albo } \frac{d}{dr}(\sigma_r\, r) = \sigma_t\right]^{12)} \quad \ldots \quad (7)$$

Warunek równowagi bowiem musi się spełniać dla każdego kontinuum materjalnego. Można go także napisać w postaci:

---

[11]) W ostatnich czasach spotyka się w naszem piśmiennictwie zamiast „wytężenia" nazwę „wysiłek", która ma duże widoki powodzenia jako krótsza i doskonale charakteryzująca wielkość mechaniczną o którą idzie.

[12]) To samo równanie stanowi punkt wyjścia teorji odkształceń sprężystych, oczywiście w połączeniu ze związkami między odkształceniami ε a naprężeniami dostarczanemi przez uogólnione prawo Hooke'a.

$$\frac{dP}{dr} + \frac{P+T}{r} = 0, \quad \left(\text{albo:} \frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_t - \sigma_r}{r}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7^*)$$

Ażeby zadanie było matematycznie określone potrzeba jeszcze dalszych związków między szukanemi naprężeniami oraz odpowiedniemi odkształceniami. Jeden z tych związków daje warunek plastyczności na podstawie hipotezy energji postaciowej w postaci:

$$(P+T)^2 + (P+S)^2 + (T-S)^2 = 2K^2 \text{ [13]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Następny związek wynika z założenia potwierdzonego wcale dokładnie doświadczeniami, że objętość elementu nie zmienia się wskutek odkształceń plastycznych. A zatem przy *założeniu małych odkształceń* winno być:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_l = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Zważywszy zaś, że $\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$, $\varepsilon_t = \frac{u}{r}$, jeżeli u oznacza teraz przesunięcie radjalne wskutek odkształcenia plastycznego, możemy „równanie ciągłości" (9) napisać w postaci:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} + \varepsilon_l = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9^*)$$

(Liczba ε_l ma tutaj oczywiście charakter stałej, niezależnej od r) [14]).

Dalsze potrzebne związki polegają na założeniu analogicznem do założeń teorji sprężystości, że kierunki główne stanu odkształcenia zlewają się z kierunkami głównemi stanu napięcia, a nadto, że stosunek różnicy (algebraicznej) dwu którychkolwiek naprężeń głównych do odpowiedniej różnicy wydłużeń głównych nie zależy w danym punkcie ciała od wyboru tych naprężeń, a zatem:

$$\frac{P+T}{\varepsilon_t - \varepsilon_r} = \frac{T-S}{\varepsilon_t - \varepsilon_l} = \frac{S+P}{\varepsilon_l - \varepsilon_r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

(albo przy znakowaniu Podręczn. Inż.

$$\left.\frac{\sigma_r - \sigma_t}{\varepsilon_r - \varepsilon_t} = \frac{\sigma_t - \sigma_l}{\varepsilon_t - \varepsilon_l} = \frac{\sigma_l - \sigma_r}{\varepsilon_l - \varepsilon_r}\right).$$

---

[13]) Ta postać warunku plastyczności przy oznaczeniach Podręczn. Inż. ma wygląd:

$$(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_t)^2 = 2K^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8')$$

co przy założeniu $K = \sigma_{red}$ jest identyczne z (4').

[14]) Por. poniżej komentarz do wyniku z rów. (24).

Atoli wartość powyższego stosunku zmienia się od punktu do punktu i w naszym przypadku będzie określona funkcją r.

Nietrudno zauważyć, że równania (9) i (10) są równoważne trzem następującym:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{1}{\Omega}\left[T - \frac{1}{2}(S-P)\right] \\ \varepsilon_r &= \frac{1}{\Omega}\left[P - \frac{1}{2}(S+T)\right] \\ \varepsilon_l &= \frac{1}{\Omega}\left[S - \frac{1}{2}(T-P)\right] \end{aligned}\right\}, \quad \text{albo} \quad \left.\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{1}{\Omega}\left[\sigma_t - \frac{1}{2}(\sigma_r+\sigma_l)\right] \\ \varepsilon_r &= \frac{1}{\Omega}\left[\sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_l+\sigma_t)\right] \\ &= \frac{1}{\Omega}\left[\sigma_l - \frac{1}{2}(\sigma_t+\sigma_r)\right] \end{aligned}\right\} \quad . \ . \quad (11)$$

Te równania mają napozór postać zupełnie podobną do równań teorji sprężystości przy wartości liczby Poisson'a równej $^1/_2$ i module Ω. Ale jak już zaznaczono powyżej, nie mamy tutaj do czynienia ze stałą, gdyż Ω jest funkcją promienia r (a w zagadnieniach ogólniejszych będzie funkcją spółrzędnych miejsca).

W pięciu równaniach warunkowych zawartych we wzorach (7), (8), (9) i (11) mamy jednakże 7 niewiadomych: T, P, S, ε_t, ε_r, ε_l i Ω. Jednego z brakujących równań dostarczy niewyzyskany jeszcze drugi warunek równowagi. Warunek ten wyraża, że wypadkowa nacisków na dno rury, t. j. $(R_0^2 . \pi . p)$ musi być równa wypadkowej naprężeń bezwzględnych („napięć") w przekroju poprzecznym rury, czyli

$$R_0^2 \pi p = \int_{R_0}^{R_1} S . 2\pi r\, dr,$$

albo

$$p = \frac{2}{R_0^2} \int_{R_0}^{R_1} S r\, dr. \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (12)$$

Ostatnie brakujące równanie tkwi w warunkach krańcowych i jak zobaczymy, da się sformułować wogóle tylko wtedy, gdy mamy do czynienia z dwoma obszarami: jeden stanu plastycznego a drugi sprężystego. Dlatego rozwiążemy narazie układ równań tylko ze względu na niewiadome

$$P,\ T,\ S; \qquad \varepsilon_t,\ \varepsilon_r \text{ i } \Omega,$$

pozostawiając nieoznaczone ε_l.

Najpierw znajdujemy z łatwością całkę ogólną równania (9*) w postaci:

$$u = \frac{C_1}{r} - \frac{\varepsilon_l}{2} r \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (13)$$

ze stałą całkowania C_1, którą wyznaczymy potem z warunków krańcowych. A zatem:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dr} = -\frac{C_1}{r^2} - \frac{1}{2}\varepsilon_l \\ \varepsilon_t &= \frac{u}{r} = \frac{C_1}{r^2} - \frac{1}{2}\varepsilon_l \end{aligned}\right| \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (14)$$

Wprowadzając teraz Ω z wzorów (11) do (10) możemy napisać:

$$\frac{P+T}{\varepsilon_t - \varepsilon_r} = \frac{S-T}{\varepsilon_l - \varepsilon_t} = \frac{P+S}{\varepsilon_l - \varepsilon_r} = \frac{2}{3}\Omega \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (10^*)$$

Stąd przy pomocy związków (14) znajdujemy:

$$P+T = \frac{4}{3}\frac{C_1\Omega}{r^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad \left(\text{albo } \sigma_t - \sigma_r = \frac{4}{3}\frac{C_1\Omega}{r^2}\right)$$

$$S-T = \varepsilon_l\Omega + \frac{2}{3}\frac{C_1\Omega}{r^2} \dots \left(\text{albo } \sigma_l - \sigma_t = \varepsilon_l\Omega - \frac{2}{3}\frac{C_1\Omega}{r^2}\right)$$

$$P+S = \varepsilon_l\Omega + \frac{2}{3}\frac{C_1\Omega}{r^2} \dots \left(\text{albo } \sigma_r - \sigma_l = -\varepsilon_l\Omega - \frac{2}{3}\frac{C_1\Omega}{r^2}\right).$$

Wstawiwszy te wartości w warunek plastyczności (8) otrzymamy:

$$\frac{K^2}{\Omega^2} = \frac{4}{3}\frac{C_1^2}{r^4} + \varepsilon_l^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (16)$$

Ponieważ ε_l musi być w każdym przekroju rury (teoretycznie nieskończenie długiej) stałe i niezależne od r, przeto równanie powyższe określa sam spółczynnik Ω jako funkcję r w postaci:

$$\Omega = \frac{\sqrt{3}\,K r^2}{\sqrt{4C_1^2 + 3\varepsilon_l^2 r^4}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (16^*)$$

Skoro tę wartość wstawimy w pierwsze z równań (15), to kombinując je z równaniem różniczkowem (7*) znajdujemy równanie:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{4C_1K}{\sqrt{3}\,r}\cdot\frac{1}{\sqrt{4C_1^2 + 3\varepsilon_l^2 r^4}}, \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (17)$$

które po scałkowaniu określi wyrażenie P jako funkcję r.

Podstawiwszy nową zmienną:

$$\xi = \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{\varepsilon_l}{C_1}\cdot r^2,$$

napiszemy to równanie w postaci

$$dP = -\frac{K}{\sqrt{3}}\cdot\frac{d\xi}{\xi\sqrt{1+\xi^2}},$$

której całką ogólną jest:

$$P = \frac{K}{\sqrt{3}} \operatorname{logn} \frac{1+\sqrt{1+\xi^2}}{\xi} - C_2$$

Wprowadziwszy jeszcze dla skrócenia wielkość

$$h^2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{C_1}{\varepsilon_l}, \quad \text{a więc } \xi = \frac{r^2}{h^2},$$

znajdziemy przy pomocy równań (15) wzory następujące:

$$\left.\begin{aligned} P &= \frac{1}{\sqrt{3}} K \operatorname{logn} \left(\frac{h^2}{r^2} + \sqrt{1+\frac{h^4}{r^4}} \right) - C_2 \\ T &= \frac{2}{\sqrt{3}} K \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{r^4}{h^4}}} - P \\ S &= \left(\frac{r^2}{h^2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) K \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{r^4}{h^4}}} - P. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (19)$$

Dalszy rachunek winien doprowadzić do wyznaczenia stałych C_1, C_2 i ε_l z warunków krańcowych zagadnienia, które będą odmienne w przypadku (*a*) i w przypadku (*b*).

3. (Przypadek a). **Rura zamknięta pod ciśnieniem wewnętrznem w stanie częściowo plastycznym, a częściowo sprężystym.**

Oznaczmy przez R promień walca rozdzielającego obie warstwy, a przez $\bar{P}$ ciśnienie radjalne na powierzchni tego walca. Wówczas P określone pierwszem z równań (19) daje następujące równanie warunkowe do wyznaczenia stałej C_2:

$$-\bar{P} = C_2 - \frac{1}{\sqrt{3}} K \operatorname{logn} \left(\frac{h^2}{R^2} + \sqrt{1+\frac{h^4}{R^4}} \right),$$

A zatem równania

$$\left.\begin{aligned} P &= \bar{P} + \frac{1}{\sqrt{3}} K \operatorname{logn} \frac{\frac{h^2}{r^2} + \sqrt{1+\frac{h^4}{r^4}}}{\frac{h^2}{R^2} + \sqrt{1+\frac{h^4}{R^4}}} \\ T &= \frac{2K}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{r^4}{h^4}}} - P \\ S &= \left(\frac{r^2}{h^2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) K \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{r^4}{h^4}}} - P \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (20)$$

określają stan napięcia w wewnętrznej plastycznej strefie rury o grubości $(R - R_0)$. Równania te zawierają jeszcze nieznane parametry R, $\overline{P}$ i h, w których tkwią C_1 i ε_l. Do ich wyznaczenia rozporządzamy jeszcze warunkami następującemi:

Na powierzchni walca o promieniu R muszą naprężenia, obliczone z wzorów (20) oraz z wzorów analogicznych do (3a) dla strefy sprężystej, mieć wartości równe. Podobnież muszą być tutaj równe wartości u obliczone ze wzoru:

$$u = \frac{1}{M} \cdot \frac{\overline{P} \cdot R^2}{R_1^2 - R^2}\left[(1-2\mu)r + (1+\mu)\frac{R_1^2}{r}\right] \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

ważnego dla strefy sprężystej wartościom obliczonym z odpowiedniego wzoru dla strefy plastycznej. Naprężenia w strefie sprężystej są określone wzorami:

$$\left.\begin{aligned} T &= \overline{P} \cdot \frac{R^2}{R_1^2 - R^2}\left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) \\ P &= \overline{P} \cdot \frac{R^2}{R_1^2 - R^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right) \\ S &= \overline{P} \cdot \frac{R^2}{R_1^2 - R^2} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

Warunek równości naprężeń radjalnych daje równanie tożsamościowe, co było zresztą do przewidzenia. Z warunków równości naprężeń obwodowych i podłużnych znajdujemy:

$$\left.\begin{aligned} -P + \frac{2K}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^4}{r^4}}} &= \overline{P} \cdot \frac{R^2}{R_1^2 - R^2}\left(\frac{R_1^2}{R^2} + 1\right) \\ -\overline{P} + \left(\frac{R^2}{h^2} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right) K \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^4}{h^4}}} &= \overline{P} \cdot \frac{R^2}{R_1^2 - R^2} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (23)$$

Po dodaniu do pierwszego z tych równań drugiego pomnożonego przez -2 otrzymujemy warunek

$$\frac{R^2}{h^2} \cdot \frac{2K}{\sqrt{1 + \frac{R^4}{h^4}}} = 0, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

który spełnia się tylko dla $h = \infty$. Ponieważ według wzoru (18) jest h^2 proporcjonalne do C_1 wprost, a odwrotnie do ε_l; C_1 zaś jest róż-

ne od zera, przeto warunek powyższy zmusza nas do przyjęcia $\varepsilon_l = 0$[15]).

A zatem w strefie plastycznej napiszemy:

$$u = \frac{C_1}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

Po podstawieniu $h = \infty$, otrzymujemy z obu równań układu (23) zgodnie:

$$\overline{P} = \left(1 - \frac{R^2}{R_1^2}\right)\frac{K}{\sqrt{3}}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

a więc to samo, co można było napisać odrazu na podstawie rów. (6a).

Równania (22) i (26) określają stan napięcia w strefie sprężystej, t. j. dla $R_1 \geqq r \geqq R$.

W strefie plastycznej otrzymujemy z wzorów (20) po podstawieniu znalezionej wartości $h = \infty$

$$\left.\begin{aligned} P &= \overline{P} + \frac{2}{\sqrt{3}} K \operatorname{logn} \frac{R}{r}, \\ T &= \frac{2}{\sqrt{3}} K \left(1 - \operatorname{logn} \frac{R}{r}\right) - \overline{P} \\ S &= \frac{2}{\sqrt{3}} K \left(\frac{1}{2} - \operatorname{logn} \frac{R}{r}\right) - \overline{P} \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

Te wzory wraz z równ. (26) określają stan napięcia w strefie plastycznej, t. j. dla $R_0 \leqq r \leqq R$

---

[15]) Wynik ten wygląda napozór podejrzanie. Jednakże przy jego interpretacji trzeba mieć na oku pewne uproszczenie, na jakie pozwoliliśmy sobie przy ustawieniu równania różniczkowego (9*). To równanie stanowi punkt wyjścia powyższych wywodów matematycznych i odpowiada ściśle równaniu (9). W tem zaś równaniu oznaczają ε_t, ε_r, ε_l właściwie wydłużenia całkowite, złożone z wydłużeń sprężystych ε' i plastycznych ε''. A zatem suma $\varepsilon_t + \varepsilon_r + \varepsilon_l$ nie jest równa zeru, lecz jest równa $\varepsilon_t' + \varepsilon_r' + \varepsilon_l' = 3\,\varepsilon_l$, albowiem tylko $\varepsilon_t'' + \varepsilon_r'' + \varepsilon_l'' = 0$ jako zmiana objętości przy odkształceniu plastycznem. Z tego powodu równanie (9*) winno mieć właściwie postać:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} + (\varepsilon_l - 3\,\varepsilon_l') = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9^{**})$$

a wynik otrzymany z równania (24) należy interpretować w ten sposób, że wielkość niezależna od r:

$$\varepsilon_l - 3\,\varepsilon_l = 0,$$

czyli

$$\varepsilon_l'' = 2\,\varepsilon_l',$$

co już zupełnie nie razi. Widzimy przytem, że u oznacza przesunięcie punktu rury leżącego w odległości r od jej osi, wywołane odkształceniem całkowitem, t. j. złożonem z części sprężystej i plastycznej.

Wreszcie z warunku równości przesunięć u na granicy obu stref otrzymujemy na podstawie równań (21) i (25).

$$C_1 = \frac{1}{M} \cdot \frac{\overline{P} . R^4}{R_1^2 - R^2} \left[1 - 2\mu + (1+\mu) \frac{R_1^2}{R^2} \right] \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

Reasumując najważniejsze wyniki rachunku napiszemy teraz

1° Dla strefy plastycznej $(R_0 \leqq r \leqq R)$.

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{K}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{R^2}{R_1^2} + 2 \operatorname{logn} \frac{R}{r} \right), \\ T &= \frac{K}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{R^2}{R_1^2} - 2 \operatorname{logn} \frac{R}{r} \right), \\ S &= \frac{K}{\sqrt{3}} \left(\frac{R^2}{R_1^2} - 2 \operatorname{logn} \frac{R}{r} \right) \end{aligned} \right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

$$u = \frac{K}{\sqrt{3} . M} \left[(1 - 2\mu) \frac{R^2}{R_1^2} + 1 + \mu \right] \frac{R^2}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

2° dla strefy sprężystej $(R \leqq r \leqq R_1)$.

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{K}{\sqrt{3}} . \frac{R^2}{R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1 \right) \\ T &= \frac{K}{\sqrt{3}} . \frac{R^2}{R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1 \right) \\ S &= \frac{K}{\sqrt{3}} . \frac{R^2}{R_1^2} \end{aligned} \right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

$$u = \frac{K}{\sqrt{3} . M} . \frac{R^2}{R_1^2} \left[(1 - 2\mu) r + (1+\mu) \frac{R_1^2}{r} \right] \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

Ponieważ w obu powyższych grupach wzorów jest promień R warstewki rozgraniczającej obie strefy zależny oczywiście od ciśnienia wewnętrznego p, więc potrzeba jeszcze równania określającego tę zależność. Otrzymamy je poprostu z pierwszego z wzorów (29) podstawiając po prawej stronie $r = R_0$, a po lewej $P = p$, czyli:

$$p = \frac{K}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{R^2}{R_1^2} + 2 \operatorname{logn} \frac{R}{R_0} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

4. Drugie ciśnienie krytyczne w przypadku (*a*) i stan napięcia po operacji samowzmocnienia.

Z równania (33) wynika

$$\frac{dp}{dR} = \frac{2K}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{R} - \frac{R}{R_1^2} \right) = \frac{2K}{\sqrt{3}} . \frac{R_1^2 - R^2}{R_1^2 R}$$

A zatem gdy $R < R_1$ rośnie, to $\frac{dp}{dR}$ jest ciągle dodatnie, a więc p wzrasta. Nawzajem przy wzroście ciśnienia wewnętrznego p, rośnie i R, czyli granica między obu strefami przesuwa się ku zewnętrznej ścianie rury. Wartość ciśnienia, odpowiadająca osiągnięciu przez granicę ściany zewnętrznej, określa *drugie ciśnienie* krytyczne, które oznaczymy przez p'_{kr} i obliczymy ze wzoru

$$p'_{kr} = \frac{2K}{\sqrt{3}} \operatorname{logn} \frac{R_1}{R_0}.$$

Stan napięcia w rurze określają wtedy wzory otrzymane z (29) po podstawieniu $R = R_1$, czyli:

$$\left.\begin{aligned} P &= \frac{2K}{\sqrt{3}} \operatorname{logn} \frac{R_1}{r} \\ T &= \frac{2K}{\sqrt{3}} \left(1 - \operatorname{logn} \frac{R_1}{r}\right) \\ S &= \frac{2K}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} - \operatorname{logn} \frac{R_1}{r}\right) \end{aligned}\right| \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (35)$$

Tej samej postaci wzory otrzymuje A. Nádai bezpośrednio, przyjmując zgóry $\varepsilon_l = 0$ bez bliższego uzasadnienia, na str. 134 dzieła: „*Der bildsame Zustand der Werkstoffe*" (Berlin, Springer 1927).

Granice ważności wszystkich wzorów wyprowadzonych w ust. (3) można widocznie określić warunkiem

$$p_{kr} \leqq p \leqq p'_{kr}$$

Przechodząc teraz do teoretycznego wyznaczenia stanu napięcia w rurze po operacji samowzmocnienia, nie możemy oczywiście rozwiązać zadania ogólnie przy pomocy wzorów powyższych, lecz tylko dla takich skrajnych wartości ciśnień wewnętrznych służących do operacji samowzmocnienia, które leżą między pierwszą a drugą wartością krytyczną. Ponieważ efekt operacji będzie tem większy, im większe będzie p, przeto uczynimy p równe p'_{kr}. Chwila osiągnięcia tej wartości ciśnienia samowzmacniającego zdradza się w doświadczeniu, jak wiadomo, pojawieniem się linij *Lüdersa-Hartmana* na powierzchni zewnętrznej rury, oczywiście należycie wygładzonej. Dzięki zjawisku twardnienia można ciśnienie rozpychające rurę powiększyć jeszcze i wywołać stany odkształcenia i napięcia nie objęte powyższą teorją. Niema tego ograniczenia w teorji Malaval'a, ale zato jest wielce wątpliwem, czy doświadczenie wykaże równie do-

brą zgodność z obliczeniem, jaką stwierdzimy poniżej na wynikach tutaj wyprowadzonych.

Kiedy więc po osiągnięciu przez p wartości p'_{kr} określonej wzorem (34), będziemy ciśnienie zmniejszali aż do zera, to ponieważ odkształcenia powrotne odbywają się ze znaczną dokładnością według prawa odkształceń sprężystych (reguła Coulomb'a), znajdziemy końcowy stan napięcia jako superpozycję (nałożenie) stanu według wzorów (35) i stanu określonego wzorami teorji sprężystości (3a) po podstawieniu za p wartości $-p'_{kr}$. A zatem po operacji samowzmocnienia, wykonanej w powyższy sposób, pozostanie w rurze stan napięcia:

$$\left.\begin{aligned} T &= \frac{2K}{\sqrt{3}}\left[-\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2}+1\right)\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}-\operatorname{logn}\frac{R_1}{r}+1\right] \\ P &= \frac{2K}{\sqrt{3}}\left[\operatorname{logn}\frac{R_1}{r}-\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2}-1\right)\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}\right] \\ S &= \frac{2K}{\sqrt{3}}\left[-\operatorname{logn}\frac{R_1}{r}-\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}+\frac{1}{2}\right] \end{aligned}\right\} \quad . \quad (36)$$

5. Wytężenie materjału w rurze samowzmocnionej sposobem powyższym przy nowem obciążeniu ciśnieniem wewnętrznem $p < p'_{kr}$.

Wtedy naprężenia będą określone sumami odpowiednich naprężeń z wzorów (3a) i (3b), a więc:

$$\left.\begin{aligned} T &= \left(p-\frac{2K}{\sqrt{3}}\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}\right)\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2}+1\right)-\frac{2K}{\sqrt{3}}\left(\operatorname{logn}\frac{R_1}{r}-1\right) \\ P &= \left(p-\frac{2K}{\sqrt{3}}\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}\right)\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}\left(\frac{R_1^2}{r^2}-1\right)+\frac{2K}{\sqrt{3}}\operatorname{logn}\frac{R_1}{r} \\ S &= \left(p-\frac{2K}{\sqrt{3}}\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}\right)\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}-\frac{2K}{\sqrt{3}}\left(\operatorname{logn}\frac{R_1}{r}-\frac{1}{2}\right) \end{aligned}\right\} \quad (37)$$

Stąd obliczymy wytężenie materjału przy pomocy wzoru (4) na N_{red} napisanego w dogodniejszej formie następującej:

$$N^2_{red} = \frac{1}{2}(T-S)^2+\frac{1}{2}(P+S)^2+\frac{1}{2}(P+T)^2 \quad . \quad . \quad . \quad (4^*)$$

$$\left[\text{albo } \sigma^2_{red}=\frac{1}{2}(\sigma_t-\sigma_l)^2+\frac{1}{2}(\sigma_r-\sigma_t)^2+\frac{1}{2}(\sigma_l-\sigma_r)^2\right]$$

Z wzorów (37) otrzymujemy teraz:

$$T-S=\left(p-\frac{2K}{\sqrt{3}}\operatorname{logn}\frac{R_1}{R_0}\right)\frac{R_0^2}{R_1^2-R_0^2}\cdot\frac{R_1^2}{r^2}+\frac{K}{\sqrt{3}} \quad . \quad . \quad (38)$$

a oznaczywszy prawą stronę tego równania przez $F(r)$, mamy dalej:

$$P + S = F(r) \quad \text{i} \quad P + T = 2F(r) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38')$$

Po wstawieniu tych wartości w (4*) i uproszczeniu mamy:

$$N^*_{red} = \sqrt{3}\, p \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} - 2K \left(\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} \operatorname{logn} \frac{R_1}{R_0} - \frac{1}{2} \right) \quad (39)$$

albo

$$N^*_{red} = \left(\sqrt{3}\, p - 2K \operatorname{logn} \frac{R_1}{R_0} \right) \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} + K \quad . \quad . \quad (39')$$

Ponieważ pierwszy wyraz po prawej stronie równ. (39) jest identyczny z wyrażeniem na N_{red} w stanie sprężystym rury przed operacją samowzmocnienia, które to wyrażenie określa wzór (5a) przeto po odróżnieniu gwiazdką otrzymanej teraz wartości naprężenia sprowadzonego, czyli wytężenia materjału, napiszemy wzór (32) w postaci:

$$N^*_{red} = N_{red} - K \left(\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} \operatorname{logn} \frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \quad . \quad . \quad (39'')$$

Największe wytężenie w stanie sprężystym zachodzi, jak wiadomo, w warstwie wewnętrznej, t. j. dla $r = R_0$.

Wtedy będzie:

$$N^*_{red}\,(\text{dla } r = R_0) = N_{red}\,(\text{dla } r = R_0) - K \left(\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_0^2} \operatorname{logn} \frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \quad (40)$$

Ażeby się tutaj zorjentować co do znaku i wartości wyrazu w nawiasach przy K, wprowadzimy średni promień rury R' i grubość ściany $g < 2R'$.

Wtedy

$$R_1 = R' + \frac{1}{2} g, \quad R_0 = R' - \frac{1}{2} g$$

$$\operatorname{logn} \frac{R_1}{R_0} = \operatorname{logn} \frac{1 + \frac{g}{2R'}}{1 - \frac{g}{2R'}} = 2 \left[\frac{g}{2R'} + \frac{1}{3} \left(\frac{g}{2R'} \right)^3 + \dots \right]$$

a zatem

$$\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_0^2} \operatorname{logn} \frac{R_1^2}{R_0^2} = \left(1 + \frac{g}{R'} + \frac{g^2}{4R'^2} \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{g}{2R'} \right)^2 + \dots \right]$$

Z tego widać, że wyrażenie w nawiasach wzoru (40) jest zawsze dodatnie i tem większe, im większa jest grubość ściany w stosunku do średnicy rury.

Zbadajmy jeszcze wytężenie w warstwie zewnętrznej t. j. dla $r = R_1$. Określi je wzór:

$$N^*_{red}\ (\text{dla } r = R_1) = N_{red}\ (\text{dla } r = R_1) - K\left(\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\ \text{logn}\ \frac{R_1^2}{R_0^2} - 1\right) \quad (41)$$

Tutaj znajdziemy podobnie wartość wyrażenia:

$$\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\ \text{logn}\ \frac{R_1^2}{R_0^2} = \left[1 - \frac{g}{R'} + \left(\frac{g}{2R'}\right)^2\right]\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{g}{2R'}\right)^2 + \dots\right]$$

a zatem

$$N^*_{red} = N_{red} + K\left\{\frac{g}{R'} - \left(\frac{g}{2R'}\right)^2 - \left[1 - \frac{g}{R'} + \left(\frac{g}{2R'}\right)^2\right]\left[\frac{1}{3}\left(\frac{g}{2R'}\right)^2 + \frac{1}{5}\left(\frac{g}{2R'}\right)^4 + \dots\right]\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (41')$$

Z obu wyrażeń (40) i (41) nie trudno odczytać, zwłaszcza przy pomocy przedstawionych rozwinięć, że w krańcowym przypadku bardzo małej grubości ściany rury jest w przybliżeniu

$$N^*_{red} = N_{red} - \frac{Kg}{R'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40\text{A})$$

(w warstwie wewnętrznej)

$$N^*_{red} = N_{red} + \frac{Kg}{R'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41\text{A})$$

(w warstwie zewnętrznej)

Wogóle można wzory (40) i (41) napisać w postaci:

$$N^*_{red} = N_{red} - K\,.\,f_0\left(\frac{R_1}{R_0}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40')$$

(w. wewn.)

$$N^*_{red} = N_{red} + K\,f_1\left(\frac{R_1}{R^0}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41')$$

(w. zewn.)

jeżeli

$$f_0\left(\frac{R_1}{R_0}\right) = \frac{2R_1^2}{R_1^2 - R_0^2}\ \text{logn}\ \frac{R_1}{R_0} - 1$$

$$f_1\left(\frac{R_1}{R_0}\right) = 1 - \frac{2R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\ \text{logn}\ \frac{R_1}{R_0}$$

Obie funkcje f_0 i f_1 przyjmują wspólną wartość $2\,\frac{R_1 - R_0}{R_1 + R_0} = \frac{g}{R'}$ przy bardzo małych wartościach tego stosunku i obie rosną, gdy ten stosunek $\frac{g}{R'}$ rośnie. Skutek operacji samowzmocnienia, objawiający się zmniejszeniem wytężenia w zagrożonej warstwie wewnętrznej kosztem zwiększenia wytężenia w słabo obciążonej warstwie zewnętrznej, będzie przeto tem korzystniejszy, im większy jest stosunek $\frac{g}{R'}$

Szereg liczbowych wartości dla obu funkcyj podaje tabliczka następująca:

$\frac{R_1}{R_0} = 1,25$	1,5	1,75	2	2,5	3
$\frac{g}{2R_0} = 0,125$	0,250	0,375	0,5	0,75	1
$f_0 = 0,2397$	0,4596	0,6449	0,8484	1,1817	1,4719
$f_1 = 0,2066$	0,3513	0,4629	0,5379	0,6509	0,7253

6. Porównanie wzorów teorji samowzmocnienia z wynikami badań doświadczalnych.

Takie badania wykonano niedawno w Niemczech z wielką starannością. Obszerny referat odnośnej ważnej publikacji[16]) opracował płk. inż. P. Niewiadomski w naszych „Wiadomościach techniczno-artyleryjskich" № 7, skąd zaczerpnięto wartości liczbowe poniżej podane.

Dla porównania nadto z wzorami teoretycznemi, opartemi na hipotezie największego naprężenia stycznego (Coulomb'a), wystarczy zauważyć, że wzory te różnią się od wyprowadzonych w niniejsze pracy i poniżej zestawionych jedynie spółczynnikiem liczbowym mniejszym w stosunku 1 : 1,155. Do porównania posłużą wzory następujące:

1) Wzór na pierwsze ciśnienie krytyczne:

$$p_{kr} = \frac{K}{\sqrt{3}}\left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad (6a)$$

2) Wzór na drugie ciśnienie krytyczne:

$$p'_{kr} = \frac{2K}{\sqrt{3}} \operatorname{logn} \frac{R_1}{R_0} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (34)$$

3) Wzór na zwiększenie średnicy zewnętrznej $D_z = 2R_1$ otrzymamy z wzoru (32) po podstawieniu $r = R_1$ czyli:

$$\Delta D_z = 2\,\Delta R_1 = (2\,u)_{r=R_1} = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{K}{M}(2-\mu)\frac{R^2}{R_1}, \quad \ldots \quad (42)$$

który w ważnym szczególnie przypadku $R = R_1$, t. j. rozszerzenia strefy plastycznej na całą grubość ściany rury, przybiera postać:

[16]) H. Klein. „Untersuchungen an Kaltgereckten dickwandigen Röhren..." Mitl. aus d. Kais. Wilh.-Institut für Eisenforschung. BdXI Lief. 20 Düsseldorf 1929.

$$\Delta D_z = \frac{2-\mu}{\sqrt{3}} \frac{K}{M} D_z \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (42^*)$$

Badane przez H. Klein'a rury zamknięte miały wszystkie średnicę wewnętrzną 72 mm, a zewnętrzną 141 mm. Rura oznaczona Nr. 3, była ze stali chromowo-niklowej o granicy plastyczności $K = 62$ kg/mm^2, rura Nr. 5 ze stali węglistej o $K = 48{,}6$ kg/mm^2, trzecia zaś rura Nr. 7 ze stali niklowo-wolframowej o $K = 60{,}2$ kg/mm^2. Wielkości ΔD_z mierzone dla początku granicy plastyczności w warstwie zewnętrznej i odpowiednie ciśnienia wewnętrzne p'_{kr} miały wartości zestawione w tabliczce następującej:

1. Tablica wielkości mierzonych.

Nr. rury	3	5	7
ΔD_z	0,38	0,29	0,40 mm
p'_{kr}	od 3900 do 4260	2600 3000	4400 4700

Podane tutaj granice doświadczalnej wartości p'_{kr} wynikają ze spostrzeżeń czynionych w różnych przekrojach rury, której długość wynosiła 3400 mm. Te różnice dowodzą, jak stosunkowo znaczne są niejednolitości wytrzymałościowe u materjałów nawet tak wysokowartościowych jak powyższe. Obliczone z naszych wzorów (42*) i (34) wartości teoretyczne podaje niżej umieszczone zestawienie, przy założeniu $M = 21500$ kg/mm^2. Taka wartość przyjmuje się zwykle dla stali, jeżeli, jak w tym wypadku, nie wyznaczono modułu sprężystości oddzielnie dla każdej badanej sztuki. Zestawienie to zawiera nadto wartości teoretyczne, wynikające z hipotezy wytrzymałościowej Coulomb'a oraz procentowe odchylenia wartości obliczonych od mierzonych.

Z powyższego zestawienia widać nadspodziewanie dobrą zgodność naszego wzoru teoretycznego na zmianę średnicy dla wszystkich rur. Hipoteza Coulomb'a prowadzi do odchyleń przeszło dwa razy większych, a przytem tego samego znaku. Natomiast wzór teoretyczny na drugie ciśnienie krytyczne daje ze spółczynnikiem odpowiadającym hipotezie energji postaciowej wartość zgodną bardzo dobrze z doświadczeniem, ale tylko dla rury Nr. 7, podczas gdy ze spółczynnikiem odpowiadającym hipotezie Coulomb'a daje dobrą zgodność tylko dla rury Nr. 3. Dla rury Nr. 5 są wartości z obu wzorów znacznie większe od wartości mierzonej.

2. Tablica wielkości obliczonych i odchyleń tych wielkości od mierzonych.

Nr. rury	3	5	7
ΔD_z według nowego wzoru teoret. (42*) w mm	**0,391**	**0,307**	**0,380**
Odchylenie od wartości mierzonej w %	**+ 2,9**	**+ 5,8**	**— 5,0**
ΔD_z według teorji opartej na hipotezie Coulomb'a	0,339	0,266	0,329
Odchylenie od wartości mierzonej w %	— 10,9	— 8,4	— 17,7
p'_{kr} według wzoru teoret. (34) w kg/cm² (atm)	4807	3770	4670
Odchylenie od wyższej granicy wartości mierzonej w %	+ 12,8	+ 25,7	— 0,6
p'_{kr} według teorji opartej na hipotezie Coulomb'a	4160	3265	4046
Odchylenie od wyższej granicy wartości mierzonej w %	— 2,1	+ 8,8	— 14

Co się tyczy pierwszej wartości krytycznej ciśnienia, która była również obserwowana w doświadczeniach niemieckich, to liczby porównawcze są zestawione w tablicy 3.

3. Tablica wartości p_{kr}

Nr. rury		3	5	7
Według wzoru teoret. (6a) (hip. energji)		**2646**	**2075**	**2570**
Według wzoru teoret. (6a,C) hip. Coulomb'a		2290	1800	2225
Według pomiarów	od	2400	1500	2500
	do	2600	1900	2800

Jak widać, nowa hipoteza daje dla rur Nr. 3 i 7 o wiele większą zgodność z doświadczeniem od hipotezy Coulomb'a, która zato prowadzi do wartości nieco zgodniejszej z doświadczeniem dla rury Nr. 5.

Zebrawszy te wszystkie wyniki porównania można stwierdzić:

1) *Niewątpliwie lepszą zgodność z pomiarami wzorów opartych na hipotezie energji postaciowej od wzorów wypływających z hipotezy Coulomb'a.* (Inne hipotezy dają widocznie wyniki znacznie gorsze i szkoda byłoby trudu na przerachowywanie wartości podług nich).

2) *Nowoczesna teorja odkształceń plastycznych, mimo uproszczenia założeń, prowadzi w naszem zagadnieniu do wzorów wystarczająco dokładnych dla praktyki.*

3) *Należy się przeto spodziewać, że wzory wyprowadzone w ust. 4 i 5 oddają dość wiernie stan napięcia i wytężenia materjału rury, która przebyła operację samowzmocnienia.*

Dodatek.

Korzyści z operacji samowzmocnienia przez jednorazowe osiągnięcie granicy plastyczności na zewnętrznej ścianie rury wskutek stosownego ciśnienia wewnętrznego o wartości p'_{kr}, uwydatniają dobrze liczby zestawione poniżej, a obliczone na podstawie wzorów (5a) i (39") na wytężenie materjału dla rury Nr. 3 doświadczeń niemieckich.

Tablica wartości N_{red} w kg/mm²

$p =$	1000	2000	3000	**3178**	atm.
$r = 36$ mm	19,51	39,02	58,53	**62,00**	Warstwa wewnętrzna
$r = 40$ „	15,80	31,61	47,41	50,22	
$r = 50$ „	10,11	20,23	30,34	32,14	
$r = 60$ „	7,02	14,05	21,07	22,32	
$r = 70,5$ „	5,09	10,17	15,26	16,17	Warstwa zewnętrzna

Wartości wytężeń W pozostałych po operacji samowzmocnienia rury.

$r =$ 36	40	50	60	70,5 mm
W = —50,74	—29,33	3,56	21,42	32,60 kg/mm²

Przytem jest

$$W = -K\left[\frac{R_1^2}{r^2}\cdot\frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}\operatorname{logn}\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1\right]$$

Tablica wartości N_{red} w kg/mm^2

$p =$	2000	3000	4000	5000	**5780**	atm.
$r = 36$ mm	—11,73	7,78	27,30	46,80	**62,03**	Warstwa wewn.
$r = 40$ „	2,28	18,08	33,88	49,68	**62,01**	
$r = 50$ „	23,79	33,90	44,01	54,13	**62,01**	
$r = 60$ „	35,46	42,48	49,51	56,53	**62,01**	
$r = 70,5$ „	42,77	47,86	52,95	58,04	**62,00**	Warstwa zewn.

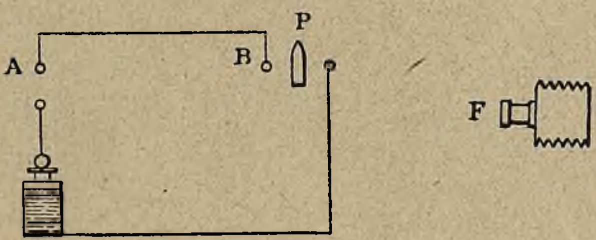
A zatem w przypadku rozpatrywanym określa wytrzymałość rury niewzmocnionej wartość ciśnienia wewnętrznego $p = 3178$ atm., podczas gdy dla rury samowzmocnionej wypada $p = 5780$ atm., czyli około 82% więcej.

531.552

MOŻDŻEŃSKI LEONARD.

ZABURZENIA WYWOŁYWANE RUCHEM POCISKU W POWIETRZU.

Zaburzenia, które wywołuje pocisk, poruszający się w powietrzu, należą do rzędu nie dość dokładnie jeszcze zbadanych, to też studja nad temi zaburzeniami są niezmiernie ciekawe, prowadzące do wniosków nieraz rewelacyjnych, uzupełniających i rozszerzających nasze wiadomości w dziedzinie aerodynamiki. Dotyczy to zwłaszcza badań nad zaburzeniami zachodzącemi w czasie ruchu pocisku, którego szybkość postępowa jest większa od szybkości dźwięku w powietrzu, t. j



Rys. 1.

większa niż 341 m/sek. Wówczas bowiem poruszający się pocisk wywołuje, jak to zobaczymy niżej, zaburzenia powietrza stale towarzyszące poruszającemu się pociskowi, co znacznie ułatwia obserwacje.

Obserwacje takie stały się możliwe z chwilą wynalezienia sposobu fotografowania poruszającego się pocisku i otaczającego go środowiska w bezpośredniej jego bliskości.

Pierwsze fotografje tego rodzaju zostały uskutecznione w roku 1881 przez profesora uniwersytetu w Pradze, E. Mach'a przy pomocy przyrządu, zbudowanego przez Toeplera.

Zasada działania przyrządu do zdjęć pocisku w locie, zbudowanego przez Toeplera, t. zw. „Schlierenapparat" (p. rys. 1) była następująca:

Bieguny przeciwne butelki Lejdejskiej zostały zaopatrzone w przewodniki w ten sposób, że pomiędzy biegunami butelki powstały dwie przerwy *A* i *B*; w przerwie *B* elektrody, pod postacią drucików metalowych, zamknięto w rurkach szklanych uniemożliwiających wyładowanie elektryczne, które bez rurek, ze względu na odległość elektrod w przerwie *A*, musiałoby nastąpić. Pocisk *P* w swym locie przez przerwę *B* rozbijał rurki szklane, powodując jednoczesne wyładowania elektryczne zarówno w przerwie *A*, jak i *B*.

Iskra, wywołana przez pocisk w punkcie *A* oświecała pocisk i otaczające go środowisko — utrwalając sylwetkę pocisku oraz środowiska na płycie fotograficznej aparatu *F*.

Przyrząd ten został w następstwie udoskonalony przez doktora L. Mach'a, który przy jego pomocy, od 1893 roku, prowadził w dalszym ciągu badania fotograficzne zjawisk, towarzyszących pociskowi w locie.

W roku 1893 C. V. Boys zbudował podobny przyrząd, lecz umożliwiający otrzymywanie zdjęć fotograficznych większych wymiarów niż przy posiłkowaniu się przyrządami Toeplera i L. Mach'a.

Badania fotograficzne przeprowadzone początkowo dotyczyły wyłącznie pocisków karabinowych. Badania te doprowadziły do wniosków, które sformułowano w sposób następujący:

1. Przed głowicą pocisku karabinowego powstaje zgęszczenie powietrza, które staje się dostrzegalnem z chwilą, gdy szybkość pocisku przekracza szybkość dźwięku, t. j. mniej więcej 341 m/sek.

2. Jeżeli pocisk karabinowy posiada dostateczną szybkość, t. j. powyżej 341 m/sek., przed jego głowicą powstaje zgęszczona warstwa powietrza, która otacza głowicę, tworząc jakby kaptur grubszy na jego czubku; czubek kaptura przypada nawprost osi głowicy, a oś jego jest styczną do toru pocisku.

Nadto smugi zgęszczonego powietrza, lecz prostolinijne, powstają wzdłuż całego pocisku, rozchodząc się stożkowo ku jego dnu, symetrycznie do toru pocisku (p. fot. 2).

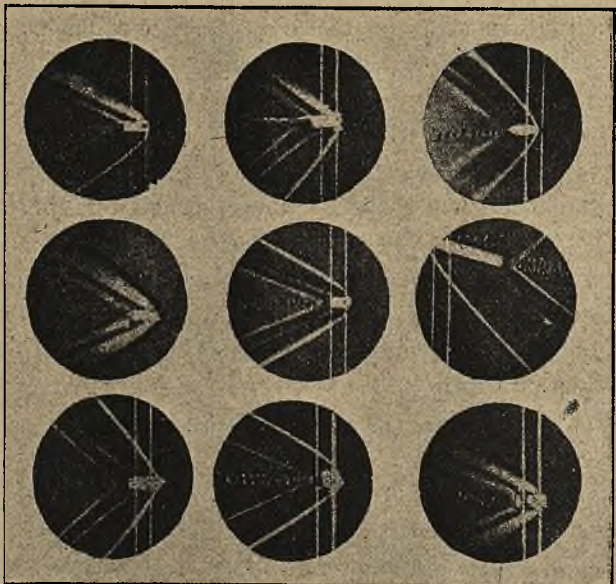
3. Pocisk, poruszający się z wielką szybkością, pozostawia za sobą przestrzeń, zapełniającą się małemi obłoczkami, swoistego wyglądu, tworzącemi wiry, dość regularnemi i symetrycznemi.

Nadto stwierdzono dodatkowo, że fale zgęszczonego powietrza,

powstające przed głowicą pocisku karabinowego w ruchu, odznaczają się szczególnemi własnościami.

Fotografując pocisk na kilka milimetrów przed taflą szklaną, do której został on wystrzelony, stwierdzono mianowicie, że tafla została rozbita na drobne kawałki zanim dotknął ją pocisk. Stąd wniosek, że rozbicie tafli należy przypisać nie pociskowi, lecz ciśnieniu powietrza przed jego głowicą.

Pocisk karabinowy wystrzelony ze znaczną szybkością do lekkiej tkaniny, zawieszonej wolno za dwa rogi, nie przebija jej również,



Rys. 2.

1 i 2 — smugi pocisku aluminjowego przy szybkości 700 m/sek.
3 i 4 — pocisk zaostrzony mosiężny, szybkość 520 m/sek.
5 — pocisk cylindryczny mosiężny, szybkość 520 m/sek.
6 — pocisk aluminjowy wydłużony, który uległ wypadkowemu zboczeniu.
7, 8 i 9 — pociski aluminjowe cylindryczne, szybkość 900 m/sek.

gdyż ciśnienie fali sprężonego powietrza przed głowicą pocisku karabinowego „zdmuchuje" tkaninę przed dotknięciem jej przez pocisk.

Wyniki osiągnięte z pociskami karabinowemi zachęciły w następstwie Mach'a i Salcher'a do przeprowadzenia podobnych badań z pociskami działowemi. Badaniom poddano pocisk 40 mm i 90 mm.

Do fotografowania tych pocisków w ruchu zastosowano następu-

jące urządzenie: pociski strzelano w rurze, w której znajdował się aparat fotograficzny; objektyw aparatu fotograficznego otwierał się pod wpływem włączenia prądu elektrycznego; to włączenie prądu powodowało równoczesne przerwanie prądu wtórnego, — co wywoływało wystrzał; przerwanie przez poruszający się pocisk drutu wyłączało prąd pierwotny, powodując zamknięcie się objektywu fotograficznego.

Zdjęcia fotograficzne, wykonane w tych warunkach, wykazały, że fala zgniotu przed głowicą pocisku jest dość szeroka, kształtu hiperbolicznego, przyczem czubek jej przypada nieco dalej, niż przy pocisku karabinowym. Prócz tego widoczne są inne fale rozchodzące się od pocisku, a biorące swój początek na nierównościach powierzchni walcowej pocisku. Pierwsze z nich powstają mianowicie przy zgrubieniu środkującem pocisku, następne zaś przy pierścieniu wiodącym, oraz przy krawędzi dna pocisku.

Co się tyczy obłoczków i wirów, powstających poza pociskiem, to i teraz stwierdzono ich obecność na fotografji pod postacią smug podłużnych, tworzących jakby ogon pocisku.

Badaniem zaburzeń, towarzyszących ruchowi pocisku w powietrzu, drogą fotografowania pocisków w locie, zajmowali się również Włosi, a mianowicie — inżynier Majorana - Calatabiano i oficer artylerji Fortima, ogłaszając wyniki swych prac w roku 1896.

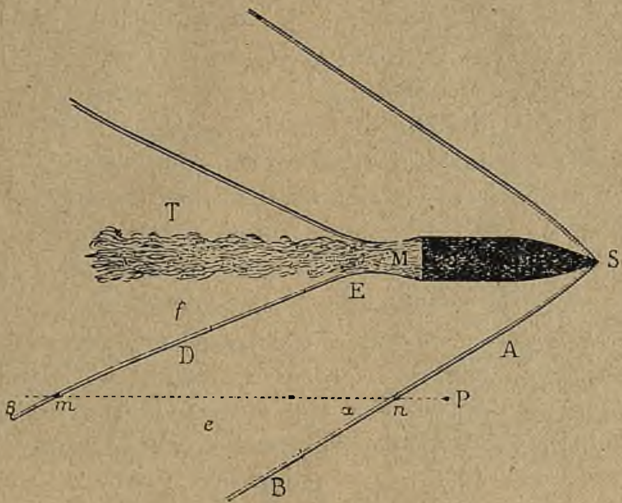
Nowsze badania w tym zakresie przeprowadzili Francuzi: generał Charbonnier, kapitan Jacob, oraz stacja badawcza francuskiej artylerji morskiej, t. zw. „Commission de Gâvre" — w miejscowości Gâvre pod Lorient w Bretanji.

Ogólne wyniki tych badań potwierdziły rezultaty badań początkowych Mach'a, wyjaśniły jednak wiele szczegółów i ustaliły w formie sprecyzowanej kompleks zjawisk, zachodzących w powietrzu bezpośrednio otaczającem małokalibrowy pocisk w ruchu.

Zjawiska te, ujęte schematycznie na podstawie całego szeregu zdjęć fotograficznych małokalibrowego pocisku, poruszającego się z szybkością 700 m/sek. podaje poniższy szkic 3.

Na szkicu tym widzimy przed ostrołukiem poruszającego się pocisku głowicową falę balistyczną, zwaną też falą zgniotu lub falą uderzenia. Fala ta powstaje na samym czubku ostrołuku pocisku i jest w tem miejscu nieco zaokrąglona, poczem przybiera powierzchnię płaską, względnie o niedostrzegalnem wygięciu, zależną od formy toru pocisku oraz zmian jego szybkości.

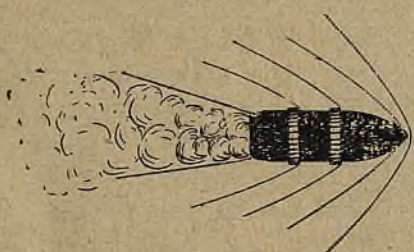
Środowisko, znajdujące się bezpośrednio poza pociskiem, jest wypełnione wirami i obłoczkami, mniej widocznemi tuż za dnem pocisku (środowisko *M*), a występującemi wyraźniej, gwałtowniej i w formie coraz to mniej regularnej, w miarę zwiększania się odległości od



Rys. 3.

dna pocisku (środowisko *T*); zaznaczyć przytem należy, że przeciętna średnica smugi wirów poza pociskiem prawie że nie ulega żadnym zmianom na całej swej długości.

W tylnej części pocisku powstaje, jak widzimy na załączonym szkicu, druga fala balistyczna (fala zgniotu lub uderzenia), fala *E—D*.



Rys. 4.

Gdy pocisk posiada nierówności na swej powierzchni, pod postacią naprzykład pierścieni wiodących, — każdy z nich powoduje powstawanie nowej fali balistycznej (fali zgniotu, fali uderzenia). To samo

dotyczy wszelkich innych nierówności zewnętrznego obrysia pocisku, jak zgrubienia środkującego, zapalnika i t. p.

Zjawisko to uwidacznia podany na str. 1099 szkic 4.

Fale balistyczne *AB* i *ED* w środowisku bezpośrednio otaczającem pocisk w locie (p. szkic 3), nie są równoległe, lecz rozchodzą się nieco. Zjawisko to zaobserwowano na wszystkich fotografjach pocisków w locie, lecz nie stwierdzono, czy fale balistyczne w miarę oddalania się od osi pocisku zachowują i nadal swój pierwotny układ wzajemny. Na przeszkodzie stoi tu głównie trudność otrzymania dostatecznie wyraźnych zdjęć fotograficznych, gdyż w miarę wzrastania odległości od osi pocisku, wzrasta również promień wygięcia tych fal, a zatem zmniejsza się ich zdolność załamywania światła, uniemożliwiając otrzymanie obrysia fali na kliszy fotograficznej.

Według teorji Hugoniot wiry i obłoczki powstają za dnem pocisku, wskutek wytwarzanej przez ruch pocisku próżni, zapełniającej się otaczającem ją powietrzem; próżnia ta według jego teorji staje się absolutną przy szybkości ponad 800 m/sek. Okazało się jednak, że próżnia absolutna nie ujawnia się nawet przy znacznie większych szybkościach (ponad 1000 m/sek), gdyż wiry i obłoczki są ciągle widoczne na zdjęciach bezpośrednio za dnem pocisku w ruchu. Pomimo to jednak stwierdzono, że rozrzedzenie powietrza rzeczywiście powstaje za dnem pocisku i rośnie w miarę wzrostu jego szybkości, oddziaływując hamująco na ruch pocisku. Badania Jacob'a nad falami, powstającemi za dnem pocisku, doprowadziły go do wniosku, że depresja, a zatem działanie hamujące, wywoływane rozrzedzeniem powietrza za pociskiem jest mniejsze przy ruchu pocisku zaostrzonego zprzodu i zakończonego ztyłu stożkiem ściętym, niż przy ruchu takiegoż pocisku o ostrołuku zaokrąglonym i ogonie cylindrycznym. Zmniejszenie się oporu ujemnego w tym wypadku wynosiło od 10% do 15%.

Wyniki tych badań zostały praktycznie wyzyskane w roku 1889 przez generała Desaleux, konstruktora znanego francuskiego pocisku karabinowego, t. zw. „D" wz. 1889, zaostrzonego zprzodu i posiadającego ogon w kształcie stożka ściętego.

W czasie wojny światowej badania fotograficzne środowiska otaczającego bezpośrednio pocisk w ruchu prowadzono ze zdwojoną energją.

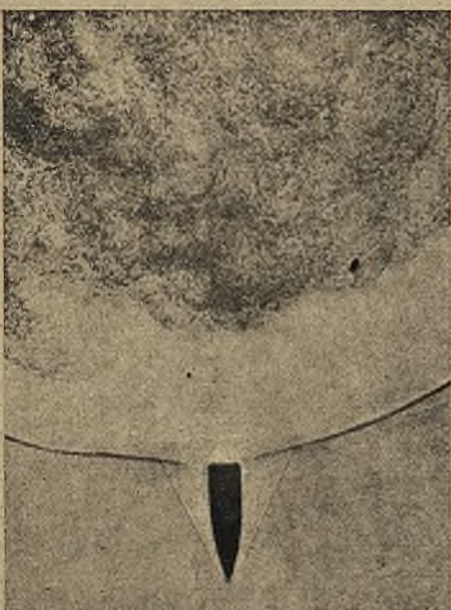
Na specjalną uwagę zasługują w tym względzie badania Cranz'a, który zdołał osiągnąć niezmiernie wyraziste i dokładne zdjęcia fotograficzne pocisku karabinowego w locie (p. fot. 5, 6, 7 i 8, pochodzące z dzieła: Lehrbuch der Balistik—C. Cranz, t. I, wyd. 2-gie, 1917).



Fot. 6.



Fot. 8.



Fot. 5.



Fot. 7.

Badania te rozszerzono przytem na pociski działowe o większych kalibrach, dotąd bowiem, jak widzieliśmy wyżej, wspomniane badania dotyczyły wyłącznie pocisków karabinowych i małokalibrowych pocisków działowych, oświetlanych w odpowiedniej chwili iskrą elektryczną. Przy badaniu pocisków większych kalibrów metoda ta nastręczała poważne trudności ze względu na konieczność oświetlania znacznych stosunkowo powierzchni, a także ze względu na to, że wskutek silnego wyładowywania się gazów u wylotu lufy, należało prowadzić obserwacje na znacznej od niego odległości.

Pierwsze badania środowiska, bezpośrednio otaczającego pocisk wielkiego kalibru w locie, zostały dokonane przez stację badawczą w Gâvre we wrześniu 1917 r., przy współudziale Ernesta Esclangon, dyrektora Obserwatorjum w Strassburgu i Noguès z Instytutu Marey. Otrzymano wówczas mianowicie nietylko zdjęcia fotograficzne, lecz nawet kinematograficzne pocisków 520 mm w locie. Ilość zdjęć wynosiła 300 na sekundę. Co do pocisków, to były to pociski balistyczne,



Fot. 9



Fot. 10.

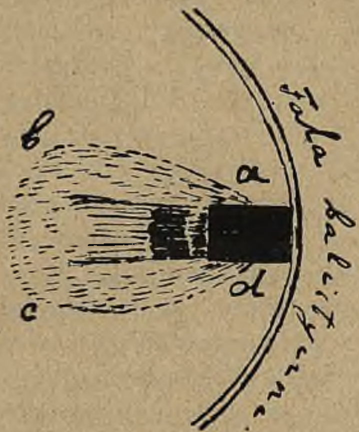
t. j. ścięte, bez ostrołuków. Zdjęć dokonano w odległości 1.700 m od wylotu lufy strzelającego działa. Pociski były wystrzelone z taką szybkością początkową, że część z nich w chwili fotografowania posiadała szybkość 320 m/sek (p. fot. 9), część zaś 360 m/sek (p. fot. 10). Porównanie obu tych zdjęć daje jasny obraz różnicy zaburzeń zachodzących w powietrzu bezpośrednio otaczającem pocisk w locie, w zależności od tego, czy szybkość danego pocisku jest mniejszą, czy też większa od szybkości dźwięku w danem środowisku, t. j. od 341 m/sek.

Metoda ta jednak posiada tę złą stronę, że zdjęcia są zbyt małe i niewyraźne, co wynika stąd, że operator musi się znajdować w dość znacznej odległości od toru pocisku (co najmniej 15 metrów), oraz stąd, że zmuszonym się jest stosować krótką odległość ogniskową.

Co się tyczy zwykłej fotografji, to otrzymano ją przy pomocy zwykłego aparatu, z ręki, fotografując pociski: 240 mm, 270 mm, 300 mm, 320 mm, 400 mm i 520 mm. Przy zdjęciach zwykłym apara-

tem należy przedewszystkiem nabrać wprawy, „widzieć" i „śledzić" pocisk, nawet, gdy przelatuje wpoprzek osi widzenia i w niewielkiej odległości od obserwatora, co nie jest zbyt trudnem, zwłaszcza, gdy się jest uprzedzonym przez błysk wystrzału, oraz gdy się wie, w którem dokładnie miejscu będzie on przelatywał. Wówczas postępuje się tak, jak przy strzelaniu do ptactwa w locie, spuszczając migawkę w czasie śledzenia aparatem lotu pocisku.

Badanie otrzymanych w ten sposób zdjęć oraz obserwacja bezpośrednia wykazały, że, gdy szybkość pocisku wielkiego kalibru jest większa od szybkości dźwięku, — poza pociskiem, a nawet już na jego ogonie powstaje jakby powłoka odbijająca światło, a mająca kształt jajowaty (*a*, *b*, *c*, *d*,), jak to obrazuje poniższy szkic 11.



Szkic 11.

Zjawisko to stwierdzono wielokrotnie, obserwując pociski 520 mm, które ze względu na swe wymiary są łatwo widoczne gołem okiem na przestrzeni wielu kilometrów toru.

Pod względem optycznym powłoka ta przedstawia się jako rodzaj obłoczka białego, bardzo drobno sfalowanego, a odbijającego się na tle nieba.

Powłoka ta jednak jest do pewnego stopnia przezroczysta, gdyż nabiera odcienia szarawego, gdy jest obserwowana na tle terenu. Wewnątrz tej powłoki są widoczne smugi ciemniejsze, jakby odrywające się od krawędzi tylnego ścięcia pocisku (p. szkic 11).

Faktem, zasługującym na specjalną uwagę, jest zupełny zanik tego zjawiska z chwilą, gdy szybkość pocisku spada poniżej szybkości dźwięku.

Już przy szybkości 320 m/sek, — pocisk jest zupełnie „czysty", zarówno na fotografji, jak i oglądany gołem okiem.

Obrysie przednie powłoki nie pokrywa się, jak stwierdziła obserwacja, a jak możnaby było mniemać a priori, z falą balistyczną (czyli t. zw. falą zgniotu, falą uderzenia) pocisku. Przeciwnie, stwierdzono, że przy szybkości pocisku 520 mm, wynoszącej 500 m/sek, kąt jaki tworzy fala balistyczna z osią pocisku wynosi około 40°, gdy kąt utworzony z osią pocisku przez przednie obrysie powłoki jest równy około 15° (p. szkic 11 powłoka *a, b, c, d*). Według E. Esclangon'a zjawisko to tłumaczy się w ten sposób: powietrze zgniecione pomiędzy ścięciem czołowem pocisku, a falą balistyczną wytryskuje na boki, prawie prostopadle w wypadku pocisku balistycznego, a mniej więcej wzdłuż obrysia zewnętrznego pocisku, — w wypadku pocisku z ostrołukiem. Taki wytrysk powietrza powoduje rozrzedzenie się środowiska w części tylnej pocisku, co znów wywołuje kondensowanie się pary wodnej w przestrzeni rozrzedzonej; skondensowana para wodna nadaje właśnie specjalny wygląd powłoce jajowatej (powłoka: a, b, c, d, na rys. 11), oraz powoduje odbijanie się w niej promieni świetlnych.

Smugi ciemniejsze widoczne wewnątrz powłoki są spowodowane, według E. Esclangon'a, zgęszczeniami wtórnemi, powstającemi bezpośrednio za ścięciem tylnem dna pocisku.

Jak widzimy z powyższego, metody fotograficzne w zastosowaniu do badania zjawisk, towarzyszących pociskowi w ruchu, dały, w odniesieniu do pocisków działowych większych kalibrów, niezbyt dokładne dane, a to ze względu na trudności przy dokonywaniu tego rodzaju zdjęć, oraz ze względu na to, że otrzymywane tą drogą odbitki fotograficzne są zbyt małe i niewyraźne.

W roku 1917 w Paryżu Rosjanin, fizyk Szyłowski, współpracując z prof. Langevin, prof. Sainte Laguë oraz płk. Lafay, — zastosowuje przy badaniu swych wynalazków z dziedziny zmniejszenia oporu powietrza przy ruchu pocisków działowych, metodę następującą: badany pocisk umieszcza się przed wylotem zbiornika z powietrzem pod takiem ciśnieniem, że, z chwilą otwarcia wylotu, powietrze wytryskuje na znajdujący się przed wylotem zbiornika pocisk z szybkością początkową, równą normalnej szybkości lotu danego typu pocisku.

Zastosowanie tej metody pozwoliło znacznie dokładniej, gdyż bezpośrednio, laboratoryjnie, i w najdogodniejszych warunkach badać wspomniane zjawisko. Badaniom tego rodzaju poświęcił się specjalnie, uzyskując niezmiernie bogate i cenne wyniki, — płk. Dévé.

Pułkownik Dévé wyjaśnił mianowicie gruntownie, między innemi,

istotę fali balistycznej, (czyli t. zw. fali zgniotu, fali uderzenia), o której już wspomniano wyżej.

Oto w jaki sposób charakteryzuje pułkownik Dévé istotę fali balistycznej:

Należy odróżniać falę balistyczną, wywołaną pociskiem w locie, od fali w kształcie *V*, powodowanej naprzykład dziobem poruszającego się statku, lub też jakiemkolwiek ciałem, umieszczonem w prądzie wody. W pierwszym wypadku fala balistyczna porusza się z szybkością dźwięku w powietrzu; w drugim — fala porusza się bynajmniej nie z szybkością dźwięku w wodzie, lecz z szybkością swoistą ruchowi tej fali.

Przyczyna tej różnicy jest następująca: gdy jakiekolwiek ciało porusza się w wodzie, zmuszone jest wypchnąć wodę w objętości równej swej własnej objętości zanurzenia; ponieważ woda praktycznie biorąc nie jest ściśliwa, wypchnięta ilość wody nie może ulec zmniejszeniu objętości, jakby to miało miejsce z gazem; jest więc wypychana ponad powierzchnię z pewną energją, udzielaną jej przez wypychające ciało, wylewając się na tę powierzchnię; kształt *V* takiej fali jest więc uzależniony od szybkości, z jaką może się posuwać taka fala; szybkość ta jednak nie jest stała; zależy ona od wielu czynników, a wśród nich także i od szybkości poruszającego się ciała, powodującego taką falę; w ten więc sposób kąt, jaki tworzy fala wywołana ruchem statku, jest zmienny, w zależności nietylko od szybkości poruszającego się statku, lecz także od szeregu innych czynników, czyli nie jest on uzależniony w takim stopniu od szybkości poruszającego się ciała, jak kąt fali balistycznej.

Gdy mamy do czynienia z ciałem, poruszającem się w powietrzu, ciało to toruje sobie drogę w atmosferze, zgniatając przed sobą powietrze; następuje wówczas zmniejszenie objętości powietrza równe objętości poruszającego się ciała. W tym więc wypadku w grę wchodzi szybkość przenoszenia się dźwięku, nie zaś szybkość poruszania się masy gazowej.

Gdy dany pocisk, poruszając się z szybkością, dajmy na to 50 m/sek, zdwaja swą szybkość, masa powietrza znajdująca się przed nim ulega dwukrotnie większemu zgniotowi, lecz przednia część fali zgniecionej porusza się ciągle szybciej niż pocisk, fala ta bowiem porusza się z szybkością dźwięku w powietrzu, t. j. z szybkością 341 m/sek; przednia część zgniecionej fali spycha więc warstwy powietrza z toru, po którym będzie się poruszał dany pocisk, torując mu niejako drogę w powietrzu.

Gdy jednak pocisk porusza się z szybkością większą od szybkości dźwięku w powietrzu, nic już nie toruje mu drogi w warstwach powietrza, leżących na jego torze; zgnieciona fala powietrza przed jego głowicą nie ma już bowiem możności wyprzedzić tej głowicy, jest do niej niejako przylepiona, ciągniona przez głowicę pocisku, który porusza się z szybkością większą od swoistej szybkości cząsteczek powietrza w środowisku powietrznem, czyli od szybkości dźwięku w powietrzu; pocisk wraz z przywartą do jego głowicy zgnieconą falą powietrza wbija się więc ciągle w zupełnie spokojne jeszcze warstwy powietrza, zamiast, jak to widzieliśmy uprzednio, w warstwy powietrza, które otrzymały już impuls od warstw przedtem uderzonych przez pocisk. I ta właśnie nagła zmiana, zachodząca w zasadach przenikania warstw powietrza przez ciało stałe, o szybkości poniżej 341 m/sek. i powyżej tej granicy, tłumaczy tę nagłą zmianę prawa oporu powietrza, jaka zachodzi w chwili, gdy szybkość pocisku przekracza szybkość dźwięku w powietrzu.

Fale balistyczne są, mechanicznie biorąc, tej samej natury co i zwykłe fale dźwiękowe; aby analogja stała się bardziej oczywistą, wystarczy nie brać pod uwagę okresu drgań, a rozważać jedynie jedną z fal, stanowiącą część składową fali dźwiękowej. Zjawiska słuchowe wspólne dla fal dźwiękowych i fal balistycznych dadzą się wytłumaczyć w ten sam sposób, jak to zobaczymy niżej.

Fala powstaje w danem środowisku za każdym razem, gdy w tymże środowisku wynika nagła zmiana ciśnienia, czy to wskutek wzrostu, czy też spadku ciśnienia.

W drugim wypadku, spadek ciśnienia powoduje ruch cząsteczek otaczającego środowiska ku środkowi spadku ciśnienia, co znów jest źródłem, w następstwie, wzrostu ciśnienia w tymże środku; wówczas jednak mamy do czynienia z wypadkiem pierwej rozważanym, t. j. ze wzrostem ciśnienia.

Podane wyżej wypadki powstawania fali dadzą się zobrazować w sposób następujący: wypadek pierwszy — wybuch naboju zanurzonego w wodzie, — wypadek drugi — rozbicie pod wodą balonu szklanego, w którym uprzednio wytworzono próżnię. Jeżeli wzrost i spadek ciśnienia zostały spowodowane w tym samym momencie w temże środowisku, fale, wywołane zarówno w pierwszym, jak i drugim wypadku, rozprzestrzeniają się w ten sam sposób, z tą różnicą, że fala powstała wskutek spadku ciśnienia opóźnia się w stosunku do pierwszej, t. j. powstałej wskutek wzrostu ciśnienia, o pół długości fali, czyli o czas potrzebny na to, by miejsce początkowego rozrzedzenia zajęło następujące po niem zgęszczenie.

Weźmy przykład odbicia się fali dźwiękowej w rurze. Jeżeli dno rury jest zamknięte, pół fali sprężonej, zawartej w rurze i powstrzymywanej przez jej ścianki, uderzając w dno spręża się jeszcze bardziej i to spotęgowane ciśnienie (zgęszczenie) przy dnie rury jest źródłem nowej fali, t. j. fali odbitej.

Jeżeli rura nie jest zamknięta dnem, to rozważane wyżej pół fali sprężonej z chwilą dojścia do końca rury nie jest już powstrzymywane przez ścianki rury, przyczem zmiana ta zachodzi nagle; rozważane pół fali sprężonej jest zatem źródłem nagłego rozprężenia przy końcu rury; rozprężenie to jednak, t. j. spadek ciśnienia (rozrzedzenia) przy końcu rury, powoduje w następstwie ruch dośrodkowy otaczających cząsteczek powietrza, czyli sprężenie w miejscu poprzedzającego rozprężenia ,t. j. nową falę, falę odbitą.

W porównaniu z falą odbitą od dna rury zamkniętej, fala odbita przy końcu rury otwartej jest spóźniona o czas potrzebny do powstania sprężenia w miejscu rozprężenia, spowodowanego nagłem rozrzedzeniem się ścieśnionego w rurze powietrza u wylotu tej rury.

Przeprowadzone przez pułk. Dévé doświadczenia wykazały, że fale balistyczne odpowiadają ściśle, również i co do prawa odbicia, podanym wyżej rozważaniom i zasadom powstawania fal odbitych zwykłych fal dźwiękowych.

Jakikolwiek punkt przestrzeni może być miejscem nagłej zmiany ciśnienia w czasie lub w przestrzeni. Jeżeli zmiana ciśnienia jest spowodowana przez ruch danego ciała, jest to zmiana w czasie. Jeżeli zaś zmianę tę powoduje dane ciało umieszczone nieruchomo w prądzie powietrznym, zachodzi wypadek sprężenia zprzodu, a rozprężenia ztyłu tego ciała, t. j. wypadek nagłej zmiany ciśnienia w przestrzeni, mianowicie przy danem ciele.

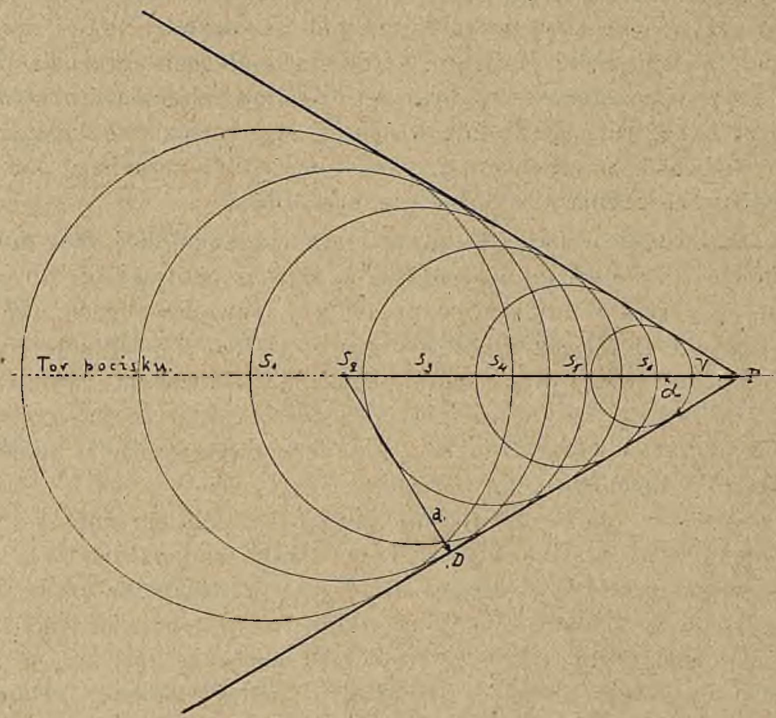
W obu wypadkach, gdy dany punkt przestrzeni jest źródłem nagłej zmiany ciśnienia, jest on punktem wyjścia fali, czyli zgodnie z teorją Huyghens'a źródłem i środkiem fali kulistej, która rozprzestrzenia się w środowisku, poruszając się razem z tem środowiskiem, gdy ono jest ruchome.

Fala kulista rozprzestrzenia się z szybkością właściwą danemu środowisku, a zależną od jego ciężaru właściwego i temperatury.

Jeżeli ta szybkość rozprzestrzeniania się w danem środowisku jest mniejsza od szybkości względnej tego środowiska w stosunku do źródła fali (p. szkic 12 — źródła S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 i t. d.) powstaje fala wypadkowa styczna do fal kulistych powstających z danego źródła; ta fala wypadkowa jest właśnie falą balistyczną (p. szkic 12).

Jak wynika z poniższego szkicu kąt α, który tworzy fala balistyczna P. D. z torem poruszającego się źródła tej fali, względnie z pasmami środowiska wzdłuż tego toru, da się z łatwością określić następującym wzorem:

$$\sin \alpha = \frac{a}{V}$$



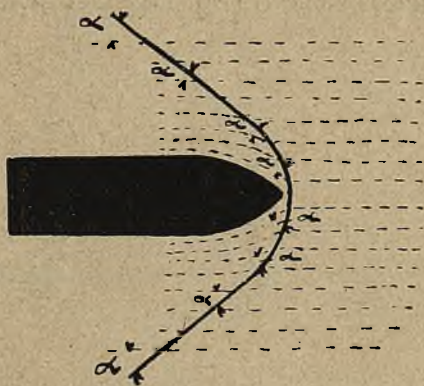
Szkic 12.

gdzie a — oznacza szybkość dźwięku w danem środowisku ($a = S_2D$ na szkicu 12), V zaś szybkość względną źródła fali w stosunku do środowiska ($V = S_2P$ na szkicu 12). Ponieważ jednak pasma powietrza w bezpośredniej bliskości danego ciała—źródła fali—są przez to ciało odchylane na boki, fala balistyczna, charakteryzująca się danym kątem α w stosunku do toru źródła fali, względnie w stosunku do pasm powietrza wzdłuż tego toru, ulega również wygięciu, odpowiadającemu odchyleniu tych pasm (p. szkic 13).

Pytanie, które nasuwa się przy rozważaniu przytoczonych wyżej danych o fali balistycznej, a mianowicie, w jaki sposób sprężenie powietrza przed głowicą pocisku w locie przenosi się na czoło fali

balistycznej, chociaż fala ta porusza się w stosunku do otaczającej atmosfery z szybkością, przekraczającą szybkość normalną przenoszenia się sprężenia w tem środowisku, t. j. w powietrzu — rozstrzyga pułkownik Dévé w sposób następujący:

Szybkość przenoszenia się sprężenia w powietrzu, co jest jednoznaczne z szybkością przenoszenia się dźwięku w powietrzu — jest zależna od gęstości powietrza, t. j. właśnie od ciśnienia. Oczywiście, że przed głowicą pocisku w locie ciśnienie jest największe, przyczem jest ono tak wielkie, iż szybkość dźwięku bezpośrednio przed głowicą pocisku w locie jest o tyle większa od szybkości pocisku, że czołowa fala balistyczna wyprzedza część głowicową pocisku. Ciśnienie



Szkic 13.

całkowite rozkłada się na powierzchnię stożkową zaokrągloną koło czubka głowicy pocisku, a wzrastającą w miarę oddalania się od pocisku; ciśnienie więc na jednostkę powierzchni, w miarę oddalania się od pocisku, maleje, a z nim również i szybkość dźwięku.

W pewnej odległości od pocisku szybkość dźwięku staje się zatem równą szybkości pocisku, a jeszcze dalej — mniejszą nawet od szybkości tegoż pocisku.

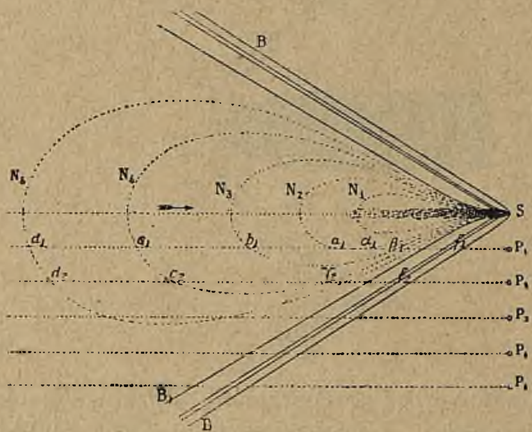
Dyrektor Obserwatorjum w Strassburgu, prof. E. Esclangon, który specjalnie badał zjawiska akustyczne, zachodzące w czasie strzelania, stwierdza na podstawie całego szeregu dowodów, że wszelka nagła zmiana ciśnienia w powietrzu jest odczuwana przez ucho ludzkie jako specjalnego rodzaju dźwięk, zwany zwykle „detonacją". Ponieważ zaś fala balistyczna jest właśnie źródłem takiej nagłej zmiany ciśnienia, odczuwamy ją, gdy przechodzi przez środowisko bezpośrednio nas otaczające, jako „detonację". Tem też tłumaczy się znane zjawisko kilkakrotnych „detonacyj", wywoływanych przelatującym

w powietrzu pociskiem, jeszcze przed jego uderzeniem w cel i wybuchem. Zjawisko to występowało ze szczególną siłą i wyrazistością w czasie bombardowania Paryża przez niemieckie działa dalekonośne.

Załączony rysunek 14 wyjaśnia obrazowo to zjawisko.

W samej rzeczy, jak widzimy z rysunku 14, obserwator, znajdujący się na jednym z poziomów P, naprzykład na poziomie P_5 usłyszy cztery następujące po sobie „detonacje" w chwili przejścia przez punkt, w którym się znajduje, każdej z czterech fal balistycznych, spowodowanych przez jeden i ten sam pocisk w ruchu, a oznaczonych na rysunku 14 literami B, f_1, f_2 B_1.

Natężenie każdej z tych czterech „detonacyj" zależne będzie oczywiście od wielkości zmiany ciśnienia, wywoływanego daną falą balistyczną.



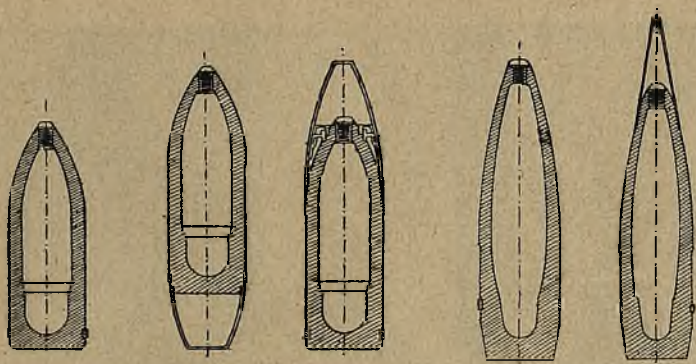
Rys. 14.

Profesor Esclangon był również jednym z pierwszych, który już w 1916 roku wykazał naukowo i doświadczalnie, że odgłosy kanonady, słyszane w odległości 20, 30, 40 kilometrów od miejsca walki, są niczem innem, jak detonacjami balistycznemi; odgłosy bowiem samych strzałów, jak również wybuchów pocisków, mogą być tylko w bardzo wyjątkowych warunkach, a zatem niezmiernie rzadko słyszane z tych odległości.

Zjawisko to tłumaczy się tem, że fale balistyczne rozprzestrzeniają się w górnych warstwach atmosfery bardziej jednorodnych, czystych, gdzie nie napotykają na swej drodze przeszkód, przeciwnie zaś fale dźwiękowe, wywoływane strzałem lub wybuchem pocisków — rozchodzą się w najniższych warstwach powietrza, a zatem środo-

wisku bardzo różnorodnem, silnie absorbującem te fale i usianem całym szeregiem przeszkód.

Nadmienić tu również wypada, że przyczyną powszechnie obserwowanego w czasie wojny, — w bezpośredniej bliskości pola walki, względnie miejsc bombardowanych, — tłuczenia się szyb w oknach zamkniętych, w przeciwieństwie do szyb okien otwartych, — jest właśnie *nagła zmiana ciśnienia,* wywołana bądź to falą balistyczną przelatującego w bliskości pocisku, bądź też wybuchem pocisku, nie zaś *wstrząśnienie powietrza,* które powodowałoby tłuczenie się szyb również i w oknach otwartych.



Pocisk 19 cm wz. 1870—93. Donośność 12.800 m.	Pocisk 19 cm M z ogonem zastępczym. Donośność 14 000 m.	Pocisk 19 cm M z głowicą zastępczą. Donośność 15.700 m.	Pocisk 19 cm F. A. D. Donośność 16.900 m.	Pocisk 19 cm F. A. D. z głowicą. zastępczą. Donośność 18.100 m.

Szkic 15.

Badanie zjawisk, towarzyszących ruchowi pocisków działowych w powietrzu, na co zwrócono specjalną uwagę, jak to widzieliśmy wyżej, zwłaszcza w czasie wojny światowej, dało nadspodziewane wyniki, a mianowicie: jedynie tylko przez nadanie pociskom działowym najodpowiedniejszego obrysia zewnętrznego, ustalonego drogą opisanych obserwacyj i badań, — zdołano, nie zmieniając nic w budowie odpowiednich dział, — powiększyć ich donośność o 20%, 30%, a nawet 50%, jak to wskazuje powyższy szkic 15.

Jako przykład, ilustrujący sposób badania prawidłowości obrysia danego typu pocisku metodą zdjęć fotograficznych tegoż pocisku, umieszczonego w prądzie powietrznym, którego szybkość odpowiada szybkości danego pocisku — podajemy fotografję Nr. 16, otrzymaną

przez pułkownika Dévé, w czasie prowadzonych przez niego doświadczeń.

Na fotografji tej widzimy, prócz czarnych fal balistycznych, wzdłuż obrysia pocisku jakby odstającą od niego, nieco ku przodowi odsuniętą, — jaśniejszą powłoczkę. Ta jaśniejsza powłoczka jest przestrzenią rozrzedzonego powietrza, zawartą pomiędzy głowicą pocisku, a otaczającemi ją strumieniami powietrza, roztrąconemi przez czubek pocisku; wskazuje ona na to, że przestrzeń ta powinna być wypełniona przez zewnętrzne obrysie pocisku(t. zw. forma właściwa pocisku Lanchestera).



Fot. 16.



Fot. 17.

Fotografja Nr. 17 dobitnie i wyraźnie ilustruje właściwy kształt obrysia pocisku (forma Lanchestera) dla danej jego szybkości i dla danej średnicy oraz formy ścięcia jego głowicy.

Wyniki osiągnięte w tej dziedzinie nie są jednak ostateczne i wszystko wskazuje na to, że dalsze badania zaburzeń, towarzyszących pociskowi w locie, pozwolą znacznie jeszcze ulepszyć jego kształt i budowę, a tem samem powiększyć jego donośność, celność, pojemność, wzgl. efekt wybuchu.

Niezmiernie interesującemi w tej dziedzinie są poglądy i pomysły pułkownika Dévé, oparte na przeprowadzonych przez niego, a opisanych wyżej, badaniach i doświadczeniach.

Pułkownik Dévé stwierdził mianowicie, że przez nadanie odpowiedniego kształtu głowicy pocisku, można osiągnąć stabilizację na

torze takich nawet pocisków, które z innym kształtem głowicy tej stabilizacji nie osiągają.

Załączona fotografja 18, wykonana przez pułkownika Dévé, dobitnie ilustruje to spostrzeżenie.

Mianowicie na zdjęciu tem widzimy pocisk z występem walcowym na części głowicowej; pocisk ten jest umieszczony w strumieniu powietrza w ten sposób, że oś pocisku tworzy kąt, wynoszący około 5 stopni z pasmami strumienia powietrza. Na fotografji 18 widać wyraźnie, w jaki sposób strumienie powietrza roztrącone przez ścięcie czołowe części wystającej, spływają z niego na pocisk, przy-



Fot. 18.

czem po stronie, w którą pocisk jest nachylony, strumienie te nie dotykają powierzchni pocisku, czyli, że przestrzeń między tą jaśniejszą powłoczką, wytworzoną przez te strumienie, a powierzchnią pocisku jest przestrzenią rozrzedzenia, po stronie przeciwnej natomiast widzimy, że jaśniejsza powłoczka, wytworzona przez spływające strumienie roztrąconego powietrza, uderza w sam pocisk; po tej też stronie powstają, prócz czołowej, dwie jeszcze dodatkowe fale balistyczne; ta więc strona pocisku odczuwa na sobie silne parcie powietrza. Rozrzedzenie z jednej, a zwiększone ciśnienie powietrza z przeciwnej strony występu cylindrycznego na głowicy pocisku, tworzy potężną parę sił, która przywraca pociskowi zbytnio wychylonemu z toru właściwe mu położenie.

Próby strzelania, przeprowadzone przez pułk. Dévé w latach

1921 do 1923 w Komisji Doświadczalnej w Wersalu i w Bourges, potwierdziły słuszność powyższych przypuszczeń, opartych na interpretacji zdjęć fotograficznych, opisanych wyżej.

Komisja Doświadczalna w Wersalu porównywała mianowicie celność na różnych odległościach pocisku karabinowego francuskiego typu „D" oraz pocisków zwanych „B_1" i „B_2", których obrysie wpisywało się w obrysie pocisku typu „D", posiadając jednak ściętą część głowicową z wystającą na tem ścięciu częścią walcową (podobnie jak na fotografji 18).

Wszystkie te pociski były strzelane ze ściśle taką samą szybkością początkową. Stwierdzono przytem, że „pocisk B_2 odznacza się przy strzelaniu na odległość 200 metrów celnością znacznie lepszą, niż pocisk typu D. Przy strzelaniu na odległości większe, około 1.000 metrów, pocisk D uzyskuje wyższość nad pociskiem B_2, gdyż jego współczynnik balistyczny jest lepszy, niż pocisku B_2".

W Bourges próbom strzelania poddano wydłużone pociski 75 mm; stwierdzono, że „pocisk 75 mm o 7 kalibrach długości ze ściętą częścią głowicową i walcowym występem na tem ścięciu (podobnie jak na fotografji 18) utrzymywał swe należyte położenie na torze, gdy tymczasem takiż pocisk, lecz ze zwykle stosowanem obrysiem głowicy, położenia normalnego na torze nie zachowywał".

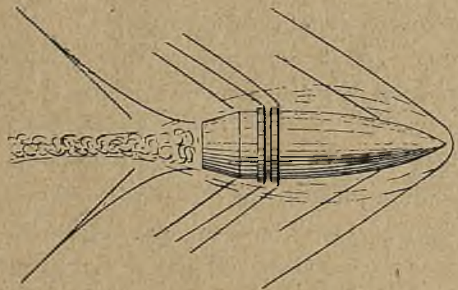
Podobnego rodzaju wnioski co do możliwości stabilizowania pocisków na torze, drogą nadania im stosownego obrysia, wysnuwa pułkownik Dévé również i z fal balistycznych, powstających poniżej głowicy pocisku w ruchu, oraz fal balistycznych przy ogonie pocisku.

Jak już wspomniano wyżej, każda nierówność na powierzchni pocisku jest źródłem fali balistycznej. Mamy więc fale balistyczne zgrubienia środkującego, fale pierścieni wiodących, fale, dość słabe zresztą, przy przejściu części walcowej pocisku w stożek ogona i wreszcie silną falę balistyczną, wywołaną rozrzedzeniem powietrza za dnem pocisku, oraz silną falą balistyczną, wywołaną zgęszczeniem powietrza w miejscu, gdzie strumienie powietrza, dążące do zapełnienia próżni poza pociskiem, zderzają się ze sobą, tworząc smugę za pociskiem.

Ponieważ te dwie ostatnie fale balistyczne powstają w strumieniach powietrza, wyginających się w kierunku toru pocisku — nie są one równoległe, lecz przeciwnie również wygięte, tworząc ze sobą pewien kąt i zbiegając się w jedną w pewnej odległości od toru pocisku, t. j. tam, gdzie strumienie powietrza stają się już równoległe do toru pocisku (p. rys. 19).

Opierając się na powyższem pułkownik Dévé proponuje zastosować do pocisków bardzo długich, których stabilizacji na torze obecnie stosowanemi metodami osiągnąć się nie da, specjalny kształt ogona uwidoczniony na rys. 20.

Jak widać z załączonego rysunku 20, ogon pocisku ma obrysie właściwe, odpowiadające szybkości danego pocisku. W tym ogonie jednak, bliżej dna, mamy specjalnego kształtu rowek, obiegający naokoło pocisk.



Rys. 19.

Gdy pocisk trzyma się normalnie na torze, strumienie powietrza ześlizgują się po obrysiu ogona, a więc ponad rowkiem, który wówczas nie ma żadnego wpływu na ruch pocisku.

Z chwilą jednak, gdy pocisk wychyla się z toru, strumienie powietrza napotykają, od strony wychylenia się dna pocisku, na rowek i leżącą za nim krawędź, powodując silną falę balistyczną, a zatem silne ciśnienie na wychylony ogon pocisku, doprowadzając pocisk do normalnego położenia na torze.



Rys. 20.

Pułkownik Dévé sądzi, że ten sposób stabilizowania pocisków na torze jest racjonalniejszy niż opisany poprzednio, a polegający na wyzyskaniu własności stabilizacyjnych występu walcowego na ściętej płasko części głowicowej pocisku, — gdyż pozwala nadać pociskowi obrysie z głowicą zaostrzoną o możliwie najdogodniejszym współczynniku balistycznym.

Na zakończenie wypada wspomnieć o znanem zjawisku słuchowem, towarzyszącem ruchowi pocisku w powietrzu, a mianowicie o t. zw. „gwiździe" pocisku.

Prof. Esclangon przypisuje to zjawisko, o ile nie jest wywołane wadliwym lotem pocisku, — wirom tworzącym się poza dnem pocisku w locie. Wiry te przy pociskach wielkich kalibrów ciągną się na przestrzeni dziesiątków, do 100 nawet metrów poza pociskiem. Te właśnie wiry przez swe powstawanie i ruchy perjodyczne wywołują okresowe wahania ciśnienia, a tem samem zjawisko „gwizdu" pocisku, przypominającego gwizd świstawki parowej.

Pociski wadliwe, zrównoważone na torze, powodują gwizd urywany, podobny do gwizdu źle zrównoważonych wirujących rakietowych ogni sztucznych.

Sama więc obserwacja charakteru „gwizdu" danego pocisku pozwala doświadczonemu obserwatorowi ściśle określić, czy dany pocisk „trzyma się dobrze toru", czy też jest źle zrównoważony, a także, jaki z danych, wystrzelonych pocisków, wykazuje najlepsze właściwości balistyczne na torze.

Ppłk. inż. RAKOWSKI HENRYK.

PRZECHOWYWANIE MATERJAŁÓW WYBUCHOWYCH I AMUNICJI.

Wstęp.

W drugiej połowie XIX wieku wzamian uniwersalnego dotychczas prochu czarnego wprowadzone zostały w użycie prochy bezdymne i materjały wybuchowe o wielkiej sile kruszącej, jak dynamity, żelatyna wybuchowa, kwas pikrynowy, materjały wybuchowe amonowe i t. d.

Nowe materjały wybuchowe znalazły szerokie zastosowanie w technice wojskowej i w przemyśle. Stanowią one potężny a tani środek, przy wypełnianiu najrozmaitszych robót, z których wiele byłoby nie do wykonania żadnemi innemi środkami technicznemi. Przy budowie tuneli, kolei żelaznych i dróg kołowych, robotach hydrotechnicznych, wydobywaniu węgla kamiennego, rud, kamienia i t. d. zużywane są kolosalne, stale wzrastające ilości materjałów wybuchowych. Stany Zjednoczone Am. P. zużywają rocznie na cele przemysłowe około 250.000 tonn, Niemcy — około 100.000 tonn, Polska — około 10.000 tonn materjałów wybuchowych. W porównaniu z tem zużycie materjałów wybuchowych na cele wojskowe stanowi podczas pokoju zaledwie niewielki ułamek.

W związku z urozmaiceniem materjałów wybuchowych i tak znacznem zastosowaniem ich, dotychczasowe przepisy bezpieczeństwa, obowiązujące przy fabrykacji, przewozie, przechowywaniu i użyciu prochów dymnych, musiano rozszerzyć i dostosować do właściwości nowowprowadzonych materjałów wybuchowych. Sprawy te ure-

gulowano we wszystkich krajach przez mniej lub więcej szczegółowe rozporządzenia ministerjalne, przepisy kolejowe, policyjne i t. p. W Polsce, poza przepisami kolejowemi, zunifikowanemi w 1925 roku [1]), obowiązują w każdej dzielnicy odnośne przepisy b. zaborczych państw, co stwarza cały szereg niedogodności. Jak najszybsze uregulowanie tych spraw byłoby ze wszech miar pożądane, zarówno dla przemysłu prywatnego, jak i dla M. S. Wojsk., jako posiadacza własnych wytwórni, warsztatów i składnic materjałów wybuchowych. Obecny nieokreślony stan utrudnia rozwój nietylko odnośnych instytucyj prywatnych, ale poniekąd i zakładów wojskowych.

Tematem niniejszego artykułu, jak to podano w tytule, jest sprawa przechowywania materjałów wybuchowych i amunicji wybuchowej. Wobec braku u nas urzędowych przepisów polskich, normujących warunki przechowywania materjałów wybuchowych, poniżej poddaję analizie posiadane odnośne przepisy zagraniczne, niestety niezupełnie kompletne i częściowo nienajnowsze, i staram się wyjaśnić, jakie wymagania i normy, sądząc z przepisów zagranicznych, powinny być przyjęte w przyszłych przepisach polskich.

Magazyny naziemne czy podziemne.

Tak wytwórca materjałów wybuchowych lub amunicji, jak i spożywca, a ewentualnie i pośrednik, musi krócej lub dłużej przechowywać je u siebie, musi więc posiadać do tego celu odpowiedni magazyn lub kompleks magazynów.

Magazyn taki powinien odpowiadać następującym zasadniczym wymaganiom:

1. chronić przechowywane materjały od wpływów atmosferycznych, od kradzieży i od zamachów;
2. w razie eksplozji wewnątrz magazynu nie zagrażać większem niebezpieczeństwem sąsiednim objektom (domom mieszkalnym, kolejom, sąsiednim magazynom i t. p.);
3. koszt budowy magazynu powinien być, o ile możliwe, niewysoki;
4. załadunek i wyładunek magazynu powinien być łatwy (musi być dogodny dojazd do magazynu, konstrukcja magazynu nie powinna utrudniać załadunku i wyładunku);
5. większe kompleksy winny być przygotowane na napady lotnicze w razie wojny.

---

[1]) p. Taryfa ogólna na przewóz towarów, zwłok i zwierząt kolejami żelaznemi w Polsce. Część I, obowiązująca od dnia 1 maja 1925 roku.

Pogodzić wszystkie wyżej przytoczone wymagania jest, właściwie mówiąc, niemożliwe.

Jeżeli chodzi o ochronę od napadów lotniczych, to jedynym radykalnym środkiem byłoby budowanie schronów podziemnych, odpowiednio zagłębionych. Schrony takie są stosunkowo bezpieczne dla otoczenia, w razie pożaru lub eksplozji posiadają tę zaletę, że temperatura w nich podlega minimalnym wahaniom, co jest bardzo pożądane przy przechowywaniu prochów bezdymnych. Budowa schronów tego rodzaju praktykowana jest w pewnych wypadkach już od kilkudziesięciu lat, szczególnie w nadmorskich twierdzach o skalistym pofalowanym terenie, gdzie wkopywano się w górę i budowano schrony, zabezpieczone od ognia artylerji morskiej.

W czasopiśmie „Wojna i Tiechnika" (Nr. 2 z 1929 r.) rosyjski prochowiec En. Że. wysuwa wniosek stopniowego zarzucenia budowy składnic amunicyjnych naziemnych, a w miarę finansowych możliwości kraju przejścia na magazyny podziemne. Liczy on, że koszt budowy tych ostatnich nieco zrekompensuje się przez zmniejszenie kosztów terenu, gdyż odległości pomiędzy schronami podziemnemi można będzie robić mniejsze, niż to przyjęto przy magazynach naziemnych [2]. Sprawę konstrukcji schronów podziemnych En. Że. uważa za rozwiązaną, a pewne trudności widzi tylko w ustaleniu odległości, jakie należy zachować pomiędzy sąsiedniemi schronami podziemnemi.

Sprawa ta jednak nie jest tak prosta. Konstrukcja schronów podziemnych jest wprawdzie rozwiązana, ale tylko przy falistym terenie, pozwalającym na boczne wkopanie się w grunt. Koszt budowy takiego schronu i dojazdu do niego jest bardzo wysoki, ale załadunek i wyładunek schronu nie jest przynajmniej specjalnie utrudniony. Nie zawsze jednak ma się do rozporządzenia odpowiednio falisty teren. Przy terenie zaś równym rozwiązanie zadania jest o wiele więcej skomplikowane i kosztowne. W obliczeniu na zdolność przebijania nowoczesnych bomb lotniczych [3], schrony należałoby zagłębiać bardzo znacznie, co wymagałoby specjalnych urządzeń mechanicznych do załadunku i wyładunku schronów, albo też, na podobieństwo umocnień fortecznych, przy stosunkowo niedużem zagłębieniu, schrony musiałyby posiadać mocne żel-betonowe sklepienia, przykryte ziemią.

[2]) Streszczenie artykułu En. Że. podane było w Przeglądzie Artyl. Nr. 2, t. IX, 1929 r., s. 178.

[3]) W luźny grunt bomba lotnicza 12 kg zagłębia się na 4 metry, bomba 300 kg — na 6,3 m i 1000 kg — na 9 m — p. artykuł mjr. Justrowa w Zeitschrift f. d. gesammte Schiess — und Sprengstoffwesen, r. 1927, s. 69.

Urządzenie w ten sposób większej ilości składnic amunicyjnych wymagałoby kolosalnych nakładów.

Ponadto kwestją nadzwyczaj trudną jest utrzymanie schronów podziemnych w stanie suchym. O ile nie są one w specjalnie suchym, skalistym gruncie, to nawet najstaranniejsza wentylacja, ustawianie misek z chlorkiem wapnia i wszelkie inne środki zaradcze nie są w stanie usunąć wilgoci, która częstokroć występuje tu w bardzo silnym stopniu.

Po wielkim pożarze składnicy amunicyjnej w Lake Denmark w 1926 r. [4]) specjalna Komisja, wyznaczona do zbadania przyczyn i skutków pożaru, między innemi wnioskami wypowiedziała się za zrewidowaniem tabeli odległości pomiędzy magazynami, „przewidując ewentualne zastosowanie magazynów obwałowanych i podziemnych". Wniosek ten wysunięto nie ze względu na przewidywane napady lotnicze, gdyż tych Stany Zjedn. A. P. nie potrzebują chyba specjalnie obawiać się, a wyłącznie ze względu na przenoszenie ognia w razie pożaru w składnicy. O ile mi wiadomo jednak, magazyny podziemne nie znalazły szerszego zastosowania w Stanach Zjedn., i dotychczas pozostają w sile przepisy bezpieczeństwa, wydane przez Departament Uzbrojenia Amerykańskiej Armji w 1924 r. [5]), zalecające magazyny amunicyjne naziemne.

W 1926 r., w związku z zamierzoną budową nowej składnicy amunicyjnej dla niemieckiej marynarki berliński „Chemisch-technische Reichsanstalt" (b. Militärversuchsamt) wydał Kierownictwu Marynarki opinję [6]), dającą się streścić w następujących punktach:

1. Magazyny o pojemności 30 tonn materjałów wybuchowych mogą być w odległości 50 metrów jeden od drugiego przy rozmieszczeniu ich w szachownicę.
2. Ściany magazynów winny być mocy nie większej niż tego wymaga konstrukcja dachów.
3. Stosowanie do budowy betonu nie jest wskazane, gdyż beton przy eksplozji daje duże odłamki.
4. Dach magazynu powinien być lekki.
5. Podłoga pożądana jest lekka z asfaltowem pokryciem, aby ułatwić przez to powstanie leja przy eksplozji.
6. Obwałowania magazynów można zaniechać.

---

[4]) Opis pożaru w Lake Denmark podany był w Przegl. Artyl., Nr. 7, 1927 r., s. 428.

[5]) p Przegl. Artyl., Nr. 1, 1926 r., s. 22.

[6]) p. Jahresbericht V (1926 r.) der Chemisch-technischen Reichsanstalt, s. 92.

7. **Budowanie podziemnych magazynów wskazane jest tylko o tyle, o ile wyrównywuje się przez to falistość terenu.**

Reasumując powyższe, wydaje mi się, że stanowisko, zajęte przez Reichsanstalt w sprawie magazynów podziemnych, jest zupełnie słuszne. W pewnych warunkach, na specjalnie zagrożonych placówkach, wyzyskując do tego falistość terenu, budowa magazynów podziemnych może być wskazana i celowa, normalnie jednak narazie, nie przesądzając przyszłego rozwoju sprawy, należy budować magazyny naziemne lekkiej konstrukcji, przy zachowaniu odpowiednich stref bezpieczeństwa. Dla ochrony zaś od napadów lotniczych w razie wojny należy przewidzieć maskowanie ważniejszych objektów (składnic i wytwórni), zaopatrzenie ich w artylerję przeciwlotniczą, a ewentualnie i w eskadry myśliwskie. Przy małych składnicach lub pojedyńczych magazynach sprawa ochrony ich od napadów lotniczych wogóle może być pominięta, gdyż prawdopodobieństwo tych napadów jest znikomo małe.

Konstrukcja magazynów naziemnych.

Naziemne magazyny amunicyjne winny być konstrukcji lekkiej, aby przy eksplozji nie dawały one większych odłamków lub palących się głowni, rozrzucanych na duże odległości. Przepisy bezpieczeństwa Departamentu Uzbrojenia Amer. Armji z 1924 r. do budowy magazynów zalecają cegłę - dziurawkę. Materjały wybuchowe wrażliwe, detonujące od trafienia w nie z karabinu (proch czarny, kwas pikrynowy, tetryl, dynamity i t. p.), należy przechowywać w magazynach, odpornych na strzały z broni małokalibrowej. Osiąga się to, budując magazyny o podwójnych ścianach z cegły-dziurawki i zapełniając przestrzeń między ścianami suchym sypkim piaskiem. Dla pozostałych materjałów wybuchowych i amunicji ściany magazynów robi się pojedyńcze. Dach winien być możliwie lekki [7]).

Konstrukcja typowego amerykańskiego magazynu amunicyjnego uwidoczniona jest na rys. 1 [8]).

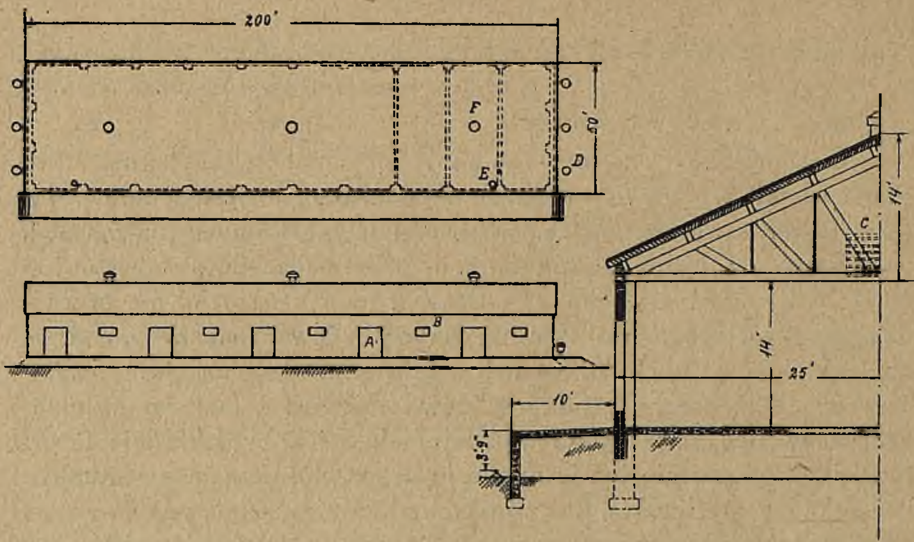
Wymiary magazynu podane są na rysunku. Magazyn posiada podłogę cementową, grub. 5", ułożoną na nasypie ziemnym, ściany grub. 8" z cegły - dziurawki, pokrycie dachowe z płyt gipsowych.

Przy ścianie frontowej magazyn posiada rampę, przy pozostałych ścianach z zewnątrz nasyp ziemny szerokości około 3 m, pokryty

---

[7]) p. Przegl. Artyl., Nr. 2—3, 1926 r., s. 126.

[8]) p. Military Pyrotechnics by H. B. Faber, Washington 1919, vol. II, s. 275.



Rys. 1.

zwierzchu piaskiem lub t. p. materjałem, zabezpieczającym od porastania nasypu roślinnością.

W pasie szerokości około 15 m dookoła magazynu roślinność ścięta.

Poza tem widzimy w magazynie:

5 drzwi wyjściowych (*A*) o wymiarach 8 × 10 stóp.

10 otworów okiennych (*B*), o wymiarach 4½ × 3 stopy, zamykanych płytami metalowemi.

3 otwory wentylacyjne w dachu (*F*), zabezpieczone siatką drucianą galwanizowaną.

2 otwory wentylacyjne (C) — w obu ścianach szczytowych— zaopatrzone w żaluzje i okiennice, na wypadek deszczu i zabezpieczone siatką drucianą galwanizowaną.

6 zbiorników (*D*), pojemności każdy 40 galonów (ok. 150 litrów), napełnionych niezamarzającym rozczynem chlorku wapnia.

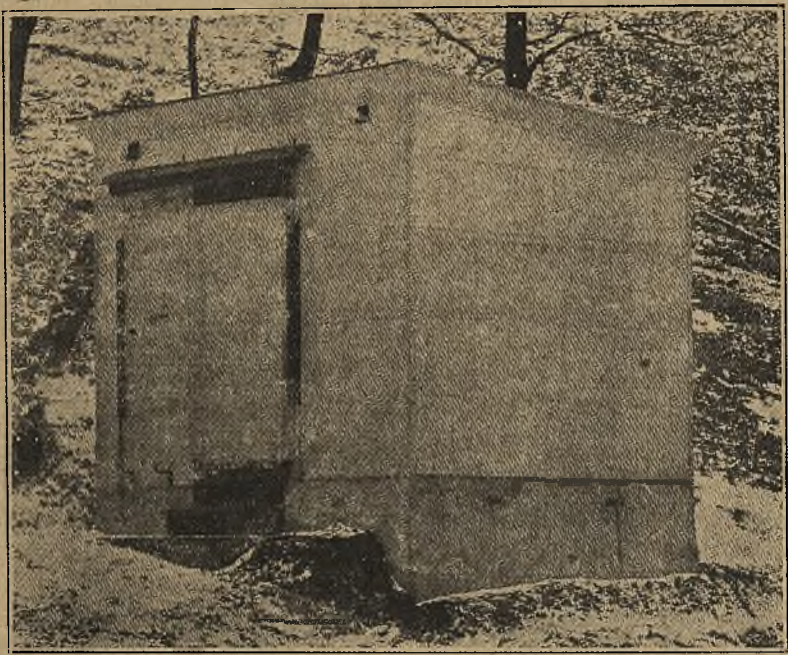
2 pompy ręczne (*E*) pojemności 2,5 galona (ok. 9,5 litra) napełnione rozczynem chlorku wapnia.

Dla celów przemysłowych Urząd Górniczy amerykański (Bureau of Mines) zaleca budowę lekkiego cementowo-betonowego magazynu, pokazanego na rys. 2. Zewnętrzne wymiary magazynu 3 × 4,25 metra, ściany grubości 15 cm, pojemność 10 do 14 tonn materjałów wy-

bychowych. Koszt budowy takiego magazynu w 1912 r. wynosił około 400 dolarów [9]).

W Anglji budują przeważnie magazyny konstrukcji ciężkiej. Zabezpieczone są one od pożaru i od przebicia odłamkami przy eksplozji sąsiedniego magazynu, ale w razie eksplozji wewnątrz dają ciężkie odłamki, rozrzucane na duże odległości, które częstokroć są przyczyną wielu ofiar.

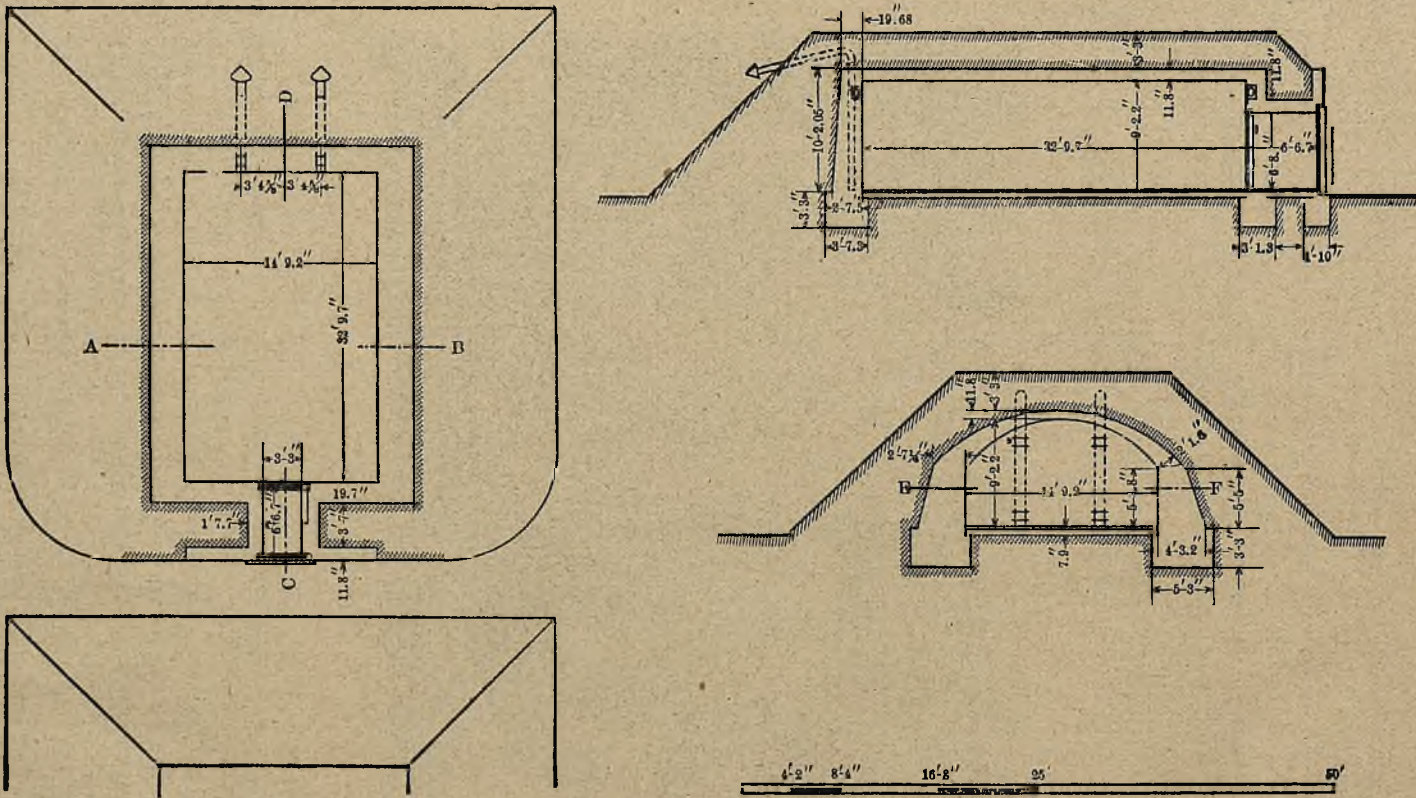
W Niemczech spotyka się stare magazyny zarówno masywne, ciężkie, podobne do angielskich, jak i lekkie drewniane. W późniejszych czasach zaczęto budować magazyny żel-betonowe i z płyt betonowych, umocowanych na ramach drewnianych. W 1911 r. w wytwórni materjałów wybuchowych firmy „Carbonit" w Schlebusch wybudowano 10 magazynów betonowych, o pojemności każdy 15 do 20 tonn, wzmocnionych cienką siatką żelazną i przysypanych dość grubą



Rys. 2.

[9]) p. Magazines and Thaw Houses for Explosives by C. Hall and S. P. Howell. Technical Paper 18. Washington 1912, s. 18.

Wobec spadku po wojnie siły nabywczej dolara am. blisko o połowę, koszt budowy takiego magazynu obecnie należy liczyć około 700 dol. am.



Rys. 3.

warstwą ziemi. Konstrukcja ta oparta była na próbach, dokonanych w 1897 r. na poligonie Kummersdorf, gdzie wysadzono dwa magazyny betonowe, załadowane dynamitem (1500 kg i 500 kg). Urządzenie magazynu firmy Carbonit wykazuje rys. 3 [10]).

Magazyny tego typu zasługują na uwagę, jako łatwe do zamaskowania i zabezpieczone od odłamków i pocisków przy eksplozji sąsiednich magazynów. Koszt budowy takiego magazynu jest mniej więcej taki sam, jak przeciętnego magazynu obwałowanego. Konstrukcja ta jednak, z nieznanych mi powodów, nie znalazła szerszego zastosowania. W 1926 r. Berliński Reichsanstalt, jak podano wyżej, zaleca Kierownictwu Marynarki niemieckiej budowę magazynów nieobwałowanych jak najlżejszej konstrukcji.

Jako materjał do budowy magazynów amunicyjnych w Niemczech stosuje się po wojnie światowej najczęściej beton pumeksowy (Bimsbeton). W 1928 r. poddano w Reichsanstalt próbom beton koksowy (Koksbeton) i stwierdzono, że jest on niepalny, mocny i łatwo rozpadający się przy eksplozji, wobec czego nadaje się do budowy magazynów amunicyjnych również dobrze jak beton pumeksowy [11]).

Jako nie fachowiec w tej dziedzinie, nie mogę się wypowiadać, jakie konstrukcje i materjały budowlane najlepiej jest stosować w naszych warunkach przy budowie magazynów amunicyjnych — jest to sprawą inżynierów-budowniczych. W każdym razie konstrukcja winna być taka, aby przy eksplozji wewnątrz magazynu nie były rozrzucane na duże odległości ciężkie odłamki i palące się głownie.

Strefy bezpieczeństwa dookoła naziemnych magazynów z materjałami wybuchowemi.

Przy przechowywaniu materjałów wybuchowych i amunicji zawsze należy się liczyć z możliwością pożaru i eksplozji. Opracowanie i wydanie nawet najszczegółowszych i najsurowszych przepisów przechowywania nie wyklucza możliwości uderzenia w magazyn pioruna [12]), przypadkowego upuszczenia skrzynki lub t. p. i wywołania przez to pożaru lub eksplozji. Z tego względu materjałów wybuchowych i amunicji nie wolno przechowywać w pierwszem lepszem pomieszczeniu, gdzie ewentualny wybuch mógłby wywołać duże ofiary w ludziach lub wielkie zniszczenie w sąsiednich objektach. Materjały te muszą być przechowywane w takich warunkach, aby w razie wy-

---

[10]) p. Technical Paper 18, s. 22.
[11]) p. Jahresbericht VII der Chemisch-technischen Reihsanstalt, s. 182.
[12]) p. Przegl. Artyl., Nr. 6, t. X, 1930 r., s. 580.

padku straty ograniczyły się, o ile możliwe, na zniszczeniu jednego magazynu i nie przybrały szerszych rozmiarów.

Zabezpieczenie sąsiednich objektów osiąga się przez zachowanie pewnych odległości pomiędzy niemi a magazynem, zawierającym materjały wybuchowe. Im odległość ta jest większa, tem zabezpieczenie sąsiednich objektów lepsze. Nie można jednak nadawać odległości zbyt wielkich, gdyż podnosi to koszty budowy (terenu i dojazdów) i utrudnia obsługę magazynów.

W celu określenia niebezpiecznych odległości przy eksplozji magazynów, jak również wyjaśnienia kwestji konstrukcyj i materjałów budowlanych, wskazanych do stosowania przy budowie magazynów materjałów wybuchowych, odnośne dane zbierane były skrzętnie przez fachowców po każdej wypadkowej eksplozji, a w niektórych krajach przeprowadzano ponadto specjalne próby.

W okresie od 1896 do 1899 r. w Niemczech na poligonie Kummersdorf zdetonowano 6 specjalnie wybudowanych o różnej konstrukcji magazynów, w których było: w dwóch po 1500 kg prochu dymnego, w dwóch po 1500 kg kwasu pikrynowego i w dwóch żelatyna wybuchowa (500 kg i 1500 kg). Dookoła tych magazynów w różnych odległościach ustawiano tarcze z desek, oszklone ramy, dynamometry i t. p. Stwierdzono przy tych próbach, że działanie fali wybuchowej jest prawie takie same na powierzchni ziemi, jak i na wysokości 10 metrów od tej powierzchni. Szybkość rozchodzenia się fali powietrznej w pobliżu miejsca wybuchu przy pomocy specjalnych urządzeń ustalono na 800 m/sek, a w odległości 250 m od miejsca wybuchu — na 332 m/sek, t. j. równą szybkości rozchodzenia się fal dźwiękowych w powietrzu. Przy próbach tych zwrócono uwagę, że na bliskich odległościach od miejsca wybuchu prawie wszystkie odłamki szyb zostały odrzucone w kierunku fali wybuchowej, na dalszych odległościach — tak w kierunku fali jak i w kierunku przeciwnym, a na jeszcze dalszych — prawie wszystkie odłamki w kierunku przeciwnym do fali wybuchowej. Tłumaczy się to zgęszczeniem i następnem rozrzedzeniem powietrza, t. j. powstaniem fali powietrznej pod wpływem eksplozji materjału wybuchowego [13]).

Podobne próby przeprowadzono w 1902 r. w Belgji w wytwórni dynamitu Arendonck i na poligonie Bewerloo. Mała ilość prób i stosowanie niedość precyzyjnych przyrządów przy tych badaniach, pomimo racjonalnych metod badania, nie pozwoliły na otrzymanie wyników pewnych i dokładnych. Próby w Bewerloo, gdzie detonowano

---

[13]) p. Koczkin. Wzrywczatyje wieszczestwa. Leningrad 1924 r.. s. 293.

dynamit w ilościach od 10 do 1000 kg, dały naogół wyniki, odpowiadające francuskiemu wzorowi $d = k\sqrt{c}$, o którym będzie mowa niżej.

N o r m y f r a n c u s k i e. Najwięcej szczegółowe badania w tej sprawie przeprowadziła w 1902 — 1904 r. Komisja materjałów wybuchowych we Francji. W wytwórni Sévran i na poligonie morskim w Gâvres poddano badaniom proch czarny, melinit i szedyt. Detonowano porcje od 0,1 do 100 kg melinitu, 150 kg szedytu i 300 kg prochu czarnego. Stwierdzono, że materjały wybuchowe kruszące (melinit, szedyt) wymagają stref bezpieczeństwa prawie półtora raza większych niż proch czarny. Na wniosek Głównego Inspektora materjałów wybuchowych M. Gouchez'a dla określenia niebezpiecznych stref przyjęto wzór: $d = k\sqrt{c}$, gdzie d — odległość danego objektu od miejsca wybuchu w metrach, c — ilość eksplodującego materjału wybuchowego w kilogramach i k — spółczynnik, zależny od materjału wybuchowego i stopnia wymaganego zabezpieczenia. Dla zabezpieczenia sąsiednich budynków od zniszczenia „średniego" przy eksplozji materjału kruszącego w nieobwałowanym magazynie ustalono $k = 10$, a przy eksplozji prochu dymnego $k = \frac{10}{\sqrt{2}}$.

Ustalając powyższy wzór, komisja podkreśliła, iż daje on tylko liczby przybliżone, które w każdym poszczególnym wypadku, w zależności od warunków lokalnych, mogą ulec pewnym zmianom. Badania komisji ograniczyły się do studjowania zniszczenia, wywoływanego przez falę wybuchową. Nie studjowano zniszczenia, powodowanego przez rozrzucane przy eksplozji odłamki i przez wstrząs ziemi. Ten ostatni zresztą jest zwykle bardzo słaby. Zniszczenie zaś przez odłamki (o ile chodzi o magazyny materjałów wybuchowych, a nie amunicji) można sprowadzić do minimum przez stosowanie odpowiednich materjałów do budowy magazynów [14]).

W następstwie przyjęto do obliczeń, że od dużego zniszczenia sąsiednich objektów zabezpiecza odległość $d = 5\sqrt{c}$, a od średniego zniszczenia — $d = 10\sqrt{c}$, przyczem za duże zniszczenie uważa się poważne uszkodzenia murowanych ścian, wywrócenie lekkich budynków i t. p., a za średnie — uszkodzenie ścian drewnianych wybicie mocno oprawionych szyb i t. p.

We Francji i Belgji nie wydano urzędowych przepisów, ustalających wielkość strefy bezpieczeństwa przy magazynach materjałów

---

[14]) p. Mem. des poudres et salpêtres t. XIII, s. 161 i Zeitschrift f. d. g. Schiess—und Sprengstoffwesen, 1907 r., s. 228.

wybuchowych, a w każdym poszczególnym wypadku strefy bezpieczeństwa, względnie maksymalne załadowanie danych magazynów ustalają specjalne komisje w zależności od warunków lokalnych, konstrukcji magazynów i t. p., posiłkując się przytem tak wyżej przytoczonemi wzorami, jak i nowszemi zdobyczami wiedzy.

Naogół przy nieobwałowanych magazynach z materjałami wybuchowemi obowiązują we Francji odległości od skupionych osiedli, odpowiadające wzorowi $d \geqq 10\sqrt{c}$ i od domów pojedyńczych $d \geqq 5\sqrt{c}$ Przy magazynach obwałowanych odległości te redukowane są na pół t. j. do $5\sqrt{c}$ względnie $2{,}5\sqrt{c}$. Przy prochu czarnym odnośne spółczynniki dzieli się przez $\sqrt{2}$, tak że wynoszą one $\frac{10}{\sqrt{2}}$ i $\frac{5}{\sqrt{2}}$, a przy magazynach obwałowanych — $\frac{5}{\sqrt{2}}$ (od osiedli) i $\frac{2{,}5}{\sqrt{2}}$ (od domów pojedyńczych). Odległości liczy się od środka magazynu do skraju osiedla, względnie do najbliższej ściany zewnętrznej sąsiedniego domu pojedyńczego.

Przy amunicji wybuchowej strefy bezpieczeństwa oblicza się według tychże wzorów, podstawiając w nie ilości materjałów wybuchowych, zawartych w amunicji.

Po wojnie światowej podjęto we Francji dalsze obszerne badania zjawisk eksplozji [15]). Między innemi, dnia 15.V. 1924 r. w pobliżu Tuluzy zdetonowano 10 tonn melinitu (w 64 beczkach). Obłok dymu sięgał 400 m na wysokość. Lej otrzymano głębokości 6 m i średnicy 20 m. Ustawione w odległości 20 do 30 m szyny żelazne zostały wyrwane, pogięte i t. p. Ale już w odległości 60 m śladów większego zniszczenia nie było. Psy, umieszczone w specjalnych dołach, w odległości 20 do 50 m od centrum wybuchu, wyszły bez żadnego szwanku. Wskazuje to, że siła wybuchu materjałów wybuchowych i amunicji, o ile nie liczyć działania odłamkowego, jest często oceniana zbyt wysoko [16]).

N o r m y a u s t r j a c k i e. W przedwojennej Austrji przepisy zezwalały na przechowywanie materjałów wybuchowych w ilościach do 3 kg w niezamieszkałych fabrycznych lub handlowych pomieszczeniach po uzyskaniu na to zatwierdzenia władz przemysłowych. Ilości wyższe musiały być przechowywane w specjalnych magazynach, lekkiej konstrukcji, nie dających w razie eksplozji wielkich odłamków,

---

[15]) p. artykuł płk. Burlot. Mem. de l'Artillerie, 1926 r., s. 935.

[16]) p. artykuł Dr. Stettbacher'a. Zeitschrift f. d. g. Schiess—nud Sprengstoffwesen. 1929, s. 130.

odpornych jednak na pociski karabinowe i zabezpieczających od kradzieży materjałów wybuchowych.

Przepisy z przed 1910 r. dzieliły sąsiadujące z magazynem objekty zewnętrzne na 2 klasy:

do klasy I należały budynki, stanowiące własność tegoż przedsiębiorstwa co i magazyn, nie należące jednak do danej składnicy lub wytwórni; budynki, których właściciele dali swą pisemną zgodę na zachowanie mniejszych odległości od magazynów i wreszcie drogi mało uczęszczane;

do klasy II należały wszystkie inne zamieszkałe domy i budynki, zakłady przemysłowe, koleje żelazne, szosy, drogi wodne i lądowe o dużym ruchu i wogóle wszelkie objekty, w których ewentualna eksplozja magazynu mogła spowodować poważniejsze skutki.

Zależnie od ilości przechowywanych materjałów wybuchowych przepisy nakazywały odległości następujące:

a) przy załadowaniu magazynu 3 do 100 kg mat. wybuchowych — od wszystkich objektów klasy I i II co najmniej 100 metrów,

b) przy załadowaniu 100 do 500 kg — od objektów kl. I co najmniej 200 m i objektów kl. II co najmniej 500 m;

c) przy załadowaniu 500 do 1000 kg — od objektów kl. I — 300 m i objektów kl. II co najmniej 1000 m,

d) przy załadowaniu 1.000 do 10.000 kg — od objektów kl. I 500 m i kl. II co najmniej 1.000 m.

Przy magazynach prochowych obowiązywały nieco mniejsze strefy bezpieczeństwa, a mianowicie:

a) przy magazynach pojemności do 100 kg prochu odległość od wszystkich objektów kl. I i II — 100 metrów;

b) przy magazynach pojemności 100 do 500 kg — od objektów kl. I — 100 m i kl. II — 200 m;

c) przy magazynach pojemności 500 do 2500 kg — od objektów kl. I — 200 m i kl. II — 350 m;

d) przy magazynach pojemności 2.500 do 10.000 kg prochu — od objektów kl. I — 450 m i kl. II — 750 m.

Sprzyjające warunki terenowe upoważniały do obniżenia powyższych odległości.

Budowa magazynów o pojemności ponad 10.000 kg materjałów wybuchowych wymagała uzyskania specjalnego zezwolenia Min. Spr. Wewn.

Władze wojskowe uprawnione były w drodze wyjątku do pewnych odchyleń od przepisów ogólnych, o ile odchylenia te były nie-

zbędne ze względów wojskowych i nie zagrażały specjalnem niebezpieczeństwem [17]).

W 1910 r. wydane zostały w Austrji nowe przepisy pod nazwą „Vorschrift für die Unterbringung der Artillerievorräte. Objekty zewnętrzne podzielono tu nieco inaczej: do klasy I zaliczono wszystkie budynki bez palenisk, w których ludzie przebywają tylko przejściowo, mało uczęszczane drogi i zakłady przemysłowe nieczynne; do klasy II zaliczono wszystkie budynki, koleje i drogi, gdzie ewentualna eksplozja mogłaby spowodować większe skutki.

Przy równym otwartym terenie przepisy te wyznaczały odległości, podane w tabeli Nr. 1.

Tabela Nr. 1 (austrjacka z 1910 r.).

Rodzaj magazynu	Normalne załadowanie magazynu w kg.	Minimalna odległość w metrach do objektów	
		Klasy I	Klasy II
Magazyny mat. wybuchowych i prochowe.	Mat. wyb. lub prochów do 100 kg od 101 do 1000 kg od 1001 do 3000 kg ponad 3000 kg	100 200 300 400	100 300 500 750
Magazyny z pociskami (z wyjątkiem granato-szrapneli.	Bez ograniczenia	200	400
Magazyny amunicji małokalibrowej	Bez ograniczenia	50	50
Laboratorja (pracownie)	—	200	300

Wartownie i biura składnic, jak również drogi i bocznice kolejowe, prowadzące do składnic nie zaliczano do objektów zagrożonych.

Przy sprzyjających warunkach terenowych powyższe odległości mogły ulec redukcji.

Składnic wojskowych przepisy te nie obowiązywały [18]).

[17]) p. Handausgabe der österreichischen Gesetze und Verordnungen, Heft 136 bearbeitet von Dr. Alois John. Wien 1902, s. 56, 120 i 127.

[18]) p. Zeitschrift f. d. g. Schiess—und Sprengstoffwesen 1910 r., s. 177 i książeczkę „O materjałach wybuchowych i amunicji wojennej", wyd. Krakowskiej Zbrojowni 1919 r., s. 41.

N o r m y n i e m i e c k i e. Przepisy *pruskie* (1902 r.) dopuszczają przejściowe przechowywanie materjałów wybuchowych w ilości do 5 kg w przygodnych niezamieszkałych pomieszczeniach po uzyskaniu na to pisemnego zezwolenia odnośnych władz. Przy ilościach większych magazyn musi być w następujących odległościach od domów mieszkalnych, warsztatów, kolei i dróg publicznych:

przy ilości mat. wybuchowych lub prochu do 50 kg — co najmniej 100 metrów;

przy ilości 51 do 250 kg — 150 m;

przy 251 do 1000 kg — 250 m;

przy ilościach ponad 1000 kg — 500 m.

Odległości te przy specjalnie sprzyjających warunkach terenowych (naturalna zasłona ziemna lub las) mogą ulec odpowiedniemu obniżeniu.

Konstrukcja magazynów, a co najmniej pokrycie dachowe, zaleca się, o ile możliwe, lekkie [19]).

Przepisy *bawarskie* (1910 r.) dzielą materjały wybuchowe na 3 klasy:

klasa I — dynamity, mat. wybuchowe chloranowe, nadchloranowe i t. p., dopuszczalne do przewozu kolejami tylko w ładunkach wagonowych;

klasa II — prochy dymne;

klasa III — materjały wybuchowe, dopuszczalne do przewozu kolejami w ładunkach drobnicowych (mat. wyb. amonowe, trotyl i t. p.).

Materjały wybuchowe kl. I w ilości do 50 kg, kl. II — do 100 kg i kl. III — do 250 kg wolno przechowywać w magazynach, znajdujących się w odległości 100 metrów od domów mieszkalnych, zakładów przemysłowych, kolei i dróg publicznych. Przy strefie bezpieczeństwa 250 m wolno przechowywać materjały wybuchowe kl. I i II w ilościach do 250 kg, przy strefie 500 m — materjały wszystkich trzech klas w ilościach do 1000 kg, a przy ilościach wyższych obowiązuje strefa 1000 metrów. Odległość między sąsiedniemi magazynami, o ile nie posiadają one zasłony naturalnej lub sztucznej, winna wynosić zasadniczo co najmniej 100 m. Przy specjalnie sprzyjających warunkach miejscowych lub gdy mają być przechowywane wyłącznie ma-

---

[19]) p. Nitroglycerin und Dynamit von Dr. R. Escales, Leipzig 1908 r., s. 285. C. Hall i S. P. Howell (p. Technical Paper 18, 1912 r.) podają, iż pruskie przepisy wymagają stref bezpieczeństwa następujących:

przy ilościach mat. wybuchowych do 150 kg — 100 m,
od 150 do 500 kg — 150 m,
i powyżej 500 kg — 300 m.

terjały wybuchowe klasy III, powyższe odległości przez odnośne władze mogą być zmniejszone [20]).

Wydana podczas wojny światowej *niemiecka instrukcja dla składnic amunicji* artyleryjskiej, *zwracanej* z frontu i *zdobycznej* [21]), zalecała następujące strefy bezpieczeństwa:

do wsi, koszar, mostów i t. p. — co najmniej 750 metrów,

do pojedyńczych domów, toru kolejowego, dróg, warsztatów i t. p. — co najmniej 250 metrów.

Magazyny — w szachownicę, jeden od drugiego w odległości 50 m. Więcej niebezpieczne magazyny, o ile odległość ich od sąsiednich budynków składnicy nie przewyższała 50 m, zalecano osłaniać ścianami ochronnemi. Przy amunicji kalibru 15 cm ściany ochronne powinny być podwójne z okrąglaków z odstępem 25 cm, wypełnione piaskiem. Przy amunicji większych kalibrów — ściany ochronne podwójne z odstępem 1 m, wypełnione piaskiem.

Niestety nie podano w instrukcji pojemności magazynów, należy jednak przypuszczać, że obliczone one były co najmniej na 80 do 120 tonn amunicji.

W Z. S. S. R. dla określenia stref bezpieczeństwa przy nieobwałowanych magazynach fabrycznych stosuje się wzór francuski $d = k\sqrt{c}$ (d — w metrach, c — w kg.), przyjmuje się jednak w nim inne spółczynniki, a mianowicie:

$k = 16{,}6$ dla objektów zewnętrznych ważnych (domów mieszkalnych, kolei i t. p.);

$k = 11$ — dla objektów zewnętrznych mniej ważnych;

i $k = 6{,}7$ — dla innych magazynów i budynków składnicy.

Przy magazynach obwałowanych spółczynnik $k = 2{,}9$, t. j. zmniejszony 5,75 razy w porównaniu do $k = 16{,}6$. Przyjęcie tych spółczynników zmusza poniekąd do obwałowywania magazynów, przynajmniej większych, aby zyskać na terenie [22]).

W ten sposób przyjmując w. w. spółczynniki tabela stref bezpieczeństwa Z. S. S. R. przedstawia się w liczbach zaokrąglonych jak podano w tabeli Nr. 2.

---

[20]) p. Sprengmittel und Sprengarbeiten von W. Weiss-Hebenstreif. München. 1920 r., s. 72.

[21]) p. Behandlung der aus dem Felde zurückgesandten deutschen und erbeuteten Munition der Feld—und Fussartillerie in den Munitions—Sammellagern. Berlin 1918.

[22]) p. Sucharewskij. Wzrywczatyje wieszczestwa i wzrywnyje raboty. Moskwa 1923 r., s. 1297 i A. W. Sapożnikow. Zawody dla proizwodstwa porochow i wzrywczatych wieszczestw. Moskwa. 1929 r., s. 34.

Tabela Nr. 2 (Z. S. S. R.).

Załadowanie magazynu mat. wyb.	Obowiązujące odległości między magazynami nieobwałowanemi a objektami ważnemi ($k = 16.6$)	objektami mniej ważn. ($k = 11$)	innemi magazynami składnicy ($k=6.7$)	Obowiązujące odległości między magazynami obwałowanemi a objektami ważnemi ($k = 2.9$)
kg	m	e	t r	ó w
50	116	77	47	20
100	166	110	67	29
250	265	176	107	46
500	372	246	150	65
1.000	525	348	212	92
2.500	830	550	335	145
5 000	1174	778	474	204
10.000	1660	1100	670	290
20.000	2290	1550	945	410
40.000	3320	2200	1340	580
60.000	4065	2695	1640	710
90.000	4980	3300	2010	870
110.000	5510	3650	2220	960

Wojskowe składnice materjałów wybuchowych (Zarządu Inżynierji Wojskowej) w *Z. S. S. R.* podlegają innym przepisom, o ile mi się wydaje, przedwojennym, pozostawionym bez zmian.

Jak podaje prof. Sucharewskij [23]), odróżnia się w Z. S. S. R. składnice wojskowe stałe i czasowe. Stałe składnice bywają duże o pojemności 20.000 pudów (327.600 kg) i małe o pojemności 4.000 pudów (65.500 kg), czasowe — duże o pojemności do 1.000 pudów (16.400 kg) i małe — do 150 pudów (2560 kg).

Duże składnice stałe winny być od pojedyńczych domów mieszkalnych, dróg publicznych, spławnych rzek i kanałów w odległości co najmniej 200 sążni (427 m), — w wyjątkowych wypadkach odległość ta może być zredukowana do 125 sążni, o ile magazyny posiadają z odnośnej strony wały ochronne, — od kolei żelaznej w odległości 400 sążni (854 m), a od granic miast, od zakładów przemysłowych i składnic łatwopalnych materjałów — w odległości 750 sążni (1600 m). Strefa szerokości 200 sążni dookoła składnicy winna stanowić własność składnicy lub być przez nią dzierżawiona.

---

[23]) p. Sucharewskij. Wzrywczatyje wieszczestwa i wzrywnyje raboty. Moskwa. 1923 r., s. 1284.

Małe składnice stałe winny być od pojedyńczych domów, dróg, rzek i kanałów w odległości 60 sążni (128 m), a od kolei, miast, zakładów przemysłowych i składnic łatwopalnych materjałów — w odległości 400 sążni.

W jednym magazynie nie zaleca się przechowywać powyżej 4.000 pudów (65.500 kg) materjałów wybuchowych.

Każdy magazyn winien być obwałowany z trzech stron. Magazyny, zawierające nie więcej jak 2.000 pudów (32.800 kg) trotylu lub t. p. materjału wybuchowego, mogą być nieobwałowane.

Odległość pomiędzy magazynami ma być 25 sążni (53 m), licząc od zewnętrznej podstawy wałów.

Wartownie murowane winny być w odległości co najmniej 20 sążni (43 m) od magazynów, wartownie drewniane — w odległości co najmniej 60 sążni (128 m).

Dookoła ogrodzenia składnicy w strefie szerokości 50 kroków prace polowe są wzbronione.

Spłonki detonujące w ilości do 15.000 sztuk wolno przechowywać nie w oddzielnym magazynie, a w oddzielnej ubikacji przy laboratorjum składnicy razem z lontami.

Czasowe składnice służą do przechowywania materjałów wybuchowych przy wypełnianiu pewnych prac lub podczas ćwiczeń.

Przy dużych składnicach czasowych (o załadowaniu do 16.400 kg mat. wyb.) obowiązuje zachowanie stref bezpieczeństwa, podanych wyżej dla małych składnic stałych.

Małe składnice czasowe (o załadowaniu do 2560 kg) winny być w odległości co najmniej 40 sążni (85 m) od pojedyńczych domów, dróg, rzek i kanałów i 100 sążni (213 m) od kolei, miast, fabryk i składów łatwopalnych materjałów.

Czasowe składy o załadowaniu do 20 pudów (327 kg) materjałów wybuchowych (z wyjątkiem prochu czarnego) wolno urządzać w obrębie miast w osobnych niezamieszkałych budynkach, przyczem przy załadowaniu 2 do 10 pudów (33 do 164 kg) odległość od pomieszczeń zamieszkałych i od ulic miejskich winna wynosić co najmniej 20 sążni (43 m), a przy załadowaniu 10 do 20 pudów (164 do 327 kg) — co najmniej 40 sążni (85 m).

Spłonki detonujące w ilości do 5.000 sztuk wolno przechowywać w każdem ogrzewanem lub nieogrzewanem byleby niewilgotnem pomieszczeniu, w dobrze zamykanej szafie, zabezpieczonej od upadku. Razem ze spłonkami wolno przechowywać w ten sposób lonty prochowe (do 3 pudów) i zapłonniki do 1000 sztuk.

Zkolei przechodzę do przepisów italskich, które pod względem stref bezpieczeństwa są najwięcej liberalne. Następnie omówimy jeszcze przepisy angielskie i amerykańskie.

Według *przepisów italskich* zachowanie pewnych stref bezpieczeństwa i uzyskanie zezwolenia odnośnych władz wymagane jest dopiero dla magazynów o pojemności ponad 200 kg materjałów wybuchowych.

Odległości, obowiązujące w Italji przy nieobwałowanych magazynach materjałów wybuchowych, wykazuje tabela Nr. 3.

Tabela Nr. 3 (Italska).

Załadowanie magazynu—mat. wyb.	Obowiązujące odległości od magazynów do			Obowiązujące odległości od osad i miast o ludności:		
	kolei, dróg publicznych, spławnych rzek i kanałów	domów mieszkalnych i prywatnej własności	zakładów przemysłowych, dużych zgrupowań domów mieszkalnych, kościołów i pomników narodowych	500 do 5000 osób	5001 do 10.000 osób	powyżej 10.000 osób
w kg	w metrach					
1	2	3	4	5	6	7
200 do 500 kg	50	70	100	150	200	200
501 do 1.000 „	75	100	150	200	250	300
1.001 do 4.500 „	100	175	250	300	350	400
4.501 do 10.000 „	100	200	300	500	500[24])	800
10.001 do 20.000 „	100	300	400	1000	1500	2000
20.001 do 40.000 „	150	500	700	1500	2000	2500
40.001 do 80.000 „	175	500	1000	2000	2500	3000

Odległości, podane w rubrykach 2, 3 i 4 tabeli Nr. 3, w pewnych wypadkach mogą być zredukowane do połowy.

Składnica może zawierać dwa lub kilka magazynów o pojemności 80.000 kg każdy, o ile magazyny są otoczone wałami, odległość pomiędzy niemi wynosi co najmniej 100 metrów, a odległości do objektów zewnętrznych odpowiadają wymaganiom tabeli Nr. 3 [25]).

Anglja posiada najstarszą i doniedawna jedyną organizację państwową, regulującą warunki wyrobu, przechowywania i transportu materjałów wybuchowych. Podczas gdy w innych krajach, w tej liczbie i w Niemczech, ograniczono się do wydania pewnej ilości przepi-

---

[24]) Prawdopodobnie błąd drukarski. Przypuszczalnie powinna tu być liczba 600 lub 700.

[25]) p. C. Hall i S. P. Howell (Technical Paper 18, 1912 r. s. 15.

Odległości do magazynów i

Liczby podane w nawiasach, są to odległości, obowiązujące przy przechowywaniu wy-
Dwa funty wyrobów pirotechnicznych lub pół funta każdego innego materjału wy-

Ilość materjałów wybuchowych, dopuszczalna do przechowywania w magazynie lub innym budynku.	funty ang. [28]	300	500	1000
(1) Związane z magazynem pomieszczenia do elaboracji amunicji małokalibrowej (w których wolno jest przechowywać 5 f. luźnego mat. wyb.—p. rozdz. 46 Aktu).	Odległości w jardach	(25)	50 (35)	50 (35)
(2) Koleje fabryczne, trakty i inne uczęszczane miejsca, kanały, doki i t. p; związane z magazynem warsztaty do wyrobu ładunków wybuchowych (w których wolno przechowywać 100 f. prochu czarnego lub 50 f. innych mat. wyb.—p. rozdz. 47 Aktu); budynki i magazyny w obrębie tego samego zakładu przemysłowego; dwa lub więcej magazynów, należących do jednego właściciela lub do kilku właścicieli, którzy wzajemnie ugodzili się.		(25)	(50) (35)	75 (50)
(3) Inne magazyny i składy mat. wybuchowych jak również pomieszczenia i warsztaty, związane z niemi, wielkie piece, paleniska wszelkich kotłów, parowozy i maszyny fabryczne.		(50)	100 (65)	150 (100)
(4) Drogi żelazne publiczne.		(50)	100 (65)	150 (100)
(5) Domy mieszkalne, których właściciele dali na piśmie zezwolenie na stosowanie mniejszych odległości.		(25)	50 (35)	75 (50)
(6) Domy mieszkalne, których właściciele zezwolenia takiego nie dali; wytwórnie, nie należące do Państwa; wytwórnie lub magazyny państwowe za zezwoleniem ich; teatry i inne miejsca zgromadzeń.		(50)	100 (65)	150 (100)
(7) Wytwórnie i magazyny państwowe, które nie dały zezwolenia na stosowanie odległości mniejszych.		(440)	880 (585)	1320 (880)
(8) Pałace i rezydencje króla i jego następców	Odległości w mil. ang.	2	2	2

[28]) Funt ang. = 450,6 g.; 1 kg. = 2,205 f. ang.
Jard = 3 stopy = 0,9144 metra.
Mila ang. = 1,609 km.

(angielska).

innych niebezpiecznych budynków.

łącznie prochu czarnego lub kordytu w prętach, o ile nie są one w metalow. skrzynkach.
buchowego może być uważane za równoznaczne z jednym funtem prochu czarnego.

2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10.000	10.000 do 100.000 f. a.
50	51	52	52	53	53	54	54	55	50 + 0,0005 *c*. gdzie *c* jest ilość mat. wybuchowego (w f. a.)
100 (75)	101 (90)	102	104	105	106	108	109	110	100 + 0,001 *c*.
200 (150)	200 (175)	200	200	200	200	200	200	200	150+0,005 *c*. do 20.000 f. a. mat. wyb. 100+0,0075 *c*. od 20.000 do 100.000 f. mat. wyb.
200 (150)	210 (175)	215 (200)	225 (210)	235 (220)	240 (230)	250 (245)	255	265	200 + 0,0065 *c*.
100 (75)	110 (90)	120 (100)	130 (110)	140 (125)	145 (140)	155 (150)	165 (160)	175	100 + 0,0075 *c*.
200 (150)	240 (175)	280 (200)	320 (255)	365 (310)	405 (360)	445 (415)	485 (470)	525	200 + 0,033 *c*.
1760 (1320)	1780 (1540)	1805 (1760)	1825 (1790)	1850 (1820)	1870 (1850)	1890 (1880)	1910 (1905)	1930	1760 (1 + 0.0001 *c*.)
2	2 1/8	2 1/4	2 1/4	2 3/8	2 1/2	2 1/2	2 5/8	2 3/4	2 + 0,00008 *c*.

sów i kilku oddzielnych rozporządzeń, dotyczących dziedziny materjałów wybuchowych, w Anglji już w 1875 r. wydano specjalny akt („Explosives Act"), regulujący całokształt wskazanych spraw. Śladem Anglji w 1917 r. poszły Stany Zjedn. A. P., wydając akt o wyrobie i przechowywaniu materjałów wybuchowych („Laws and safety standarts for the manufacture and storage of Explosives"), bardzo zbliżony w wielu punktach do angielskiego „Explosives Act".

Nadzór nad produkcją i przechowywaniem materjałów wybuchowych w Anglji i badanie wszelkich spraw, związanych z tym nadzorem, wykonują specjalni inspektorzy (Królewscy Inspektorzy materjałów wybuchowych — His Majesty's inspectors of explosives). Sprawozdania z czynności ich raz do roku przedstawiane są przez Głównego Inspektora do Ministerstwa Spr. Wewnętrznych i ogłaszane drukiem.

W wyniku utworzenia tej organizacji liczba ofiar w angielskich wytwórniach materjałów wybuchowych po 1875 roku zmniejszyła się 5—6 krotnie, w porównaniu z poprzednim okresem [26]).

Obowiązująca w Anglji tabela odległości przy magazynach materjałów wybuchowych opracowana została przez wyżej wskazanych królewskich inspektorów na podstawie danych, uzyskanych przy wypadkowych eksplozjach w wytwórniach i składnicach. Po każdej takiej eksplozji badano szczegółowo zniszczenie, spowodowane przez eksplozję, zbierano odnośne dane w miarę możności i ze źródeł zagranicznych i zgromadzono w ten sposób materjał do ułożenia tabeli odległości.

Tabela angielska (p. tabela Nr. 4) jest bardzo szczegółowa. Objekty zewnętrzne dzieli ona na 8 grup, materjały niebezpieczne na 3 grupy. W celu zachowania jej charakteru podaję ją w miarach angielskich, jak w oryginale [27]).

Odległości, podane w tabeli, mogą być zredukowane do połowy, jeżeli magazyn jest odpowiednio osłonięty przez naturalny lub sztuczny solidny wał takiej wysokości, aby przechodziła przez niego każda prosta linja, przeprowadzona od każdego punktu magazynu do ochranianego objektu zewnętrznego. O ile magazyn zakryty jest przez naturalny wzgórek, to inspektor może zezwolić na redukcję tabelarnej odległości do jednej czwartej, w żadnym jednak wypadku odległość od królewskich rezydencyj nie może być mniejsza od 2 mil. Taka re-

---

[26]) p. Sapożnikow. Zawody dla proizwodstwa porochow i wzrywczatych wieszczestw. Moskwa 1929 r., s. 158.

[27]) p. Explosives by Arthur Marshall. London 1917 r., s. 618.

dukcja odległości z tytułu osłonięcia magazynu przez wał lub wzgórek dopuszczalna jest tylko przy ilościach materjału wybuchowego, przewyższających 1.000 funtów. Dla obwałowanych małych magazynów fabrycznych istnieje do uwzględnienia u inspektorów specjalna tabela odległości.

Wobec tego, że przy pożarach nawet bardzo dużych ilości kordytów działowych (w prętach o większych wymiarach) nie zachodziły nigdy wypadki eksplozji ich, uważa się, że przy ilościach do 1.000 funtów kordyt zagraża tylko pożarem.

Amerykańskich tabel odległości przytaczam poniżej aż 5, pragnąc wykazać stopniowy rozwój omawianej sprawy w Stanach Zjedn.

Najstarsza z nich jest tabela *stanu Massachusetts* [29]. Dzieli ona objekty zewnętrzne na 2 klasy. Do objektów klasy I zalicza koleje, drogi publiczne, przystanie towarowe, jak również otwarte miejsca spacerów i zgromadzeń publicznych, do objektów klasy II — domy mieszkalne, kościoły, szkoły i szpitale, instytucje publiczne i miejskie, sądy, kryte rynki targowe, teatry, przystanie osobowe, dworce kolejowe i wszelkie inne budynki, w których zwykła gromadzić się publiczność.

Obowiązujące według tej tabeli przy magazynach nieobwałowanych odległości wykazuje tabela Nr. 5.

Tabela Nr. 5 (stanu Massachusetts).

Dopuszczalna ilość mat. wyb. w magazynie w funt. ang.	Odległości w stopach do		Dopuszczalna ilość mat wyb. w magazynie w funt. ang.	Odległości w stopach do	
	objektów klasy I	objektów klasy II		objektów klasy I	objektów klasy II
50	99	270	3.000	630	1416
100	150	351	4.000	645	1566
200	225	453	5.000	675	1716
300	255	504	10.000	795	2166
400	285	555	20.000	990	3012
500	300	606	30.000	1035	3858
600	330	657	40.000	1380	4704
700	360	708	50.000	1575	5550
800	390	756	60.000	1770	6540
900	420	810	70.000	1965	7530
1.000	450	861	80.000	2160	8520
1.500	510	1116	90.000	2355	9510
2.000	555	1266	100.000	2550	10500

[29]) p. C. Hall i S. P. Howell. Technical Paper 18. Washington 1912 r., s. 10.

Tabela Nr. 6 (Związku kolei amer.) dla magazynów obwałowanych.

Ilość mat. wyb. w magazynie w funt. ang.	Odległości w stopach do		Ilość mat. wyb. w magazynie w funt. ang.	Odległości w stopach do	
	budynków mieszkalnych	kolei żelaznych		budynków mieszkalnych	kolei żelaznych
50	120	70	10.000	890	535
100	180	110	20.000	1055	635
200	260	155	30.000	1205	725
300	320	190	40.000	1340	805
400	360	215	50.000	1460	875
500	400	240	60.000	1565	940
600	430	260	70.000	1655	995
700	460	275	80.000	1730	1040
800	490	295	90.000	1790	1075
900	510	305	100.000	1835	1100
1000	530	320	200.000	2095	1255
1500	600	360	300.000	2335	1400
2000	650	390	400.000	2555	1535
3000	710	425	500.000	2755	1655
4000	750	450	600.000	2935	1760
5000	780	470	700.000	3095	1855
6000	805	485	800.000	3235	1940
7000	830	500	900.000	3355	2015
8000	850	510	1.000.000	3455	2075
9000	870	520			

Powyższa tabela opracowana została z inicjatywy *Związku kolei amerykańskich*. Na wniosek tego Związku w 1909 r. amerykańskie wytwórnie materjałów wybuchowych wyłoniły komisję celem opracowania tabeli odległości, opartej na najnowszych danych.

Z wielkiemi trudnościami komisja zdołała zebrać mniej lub więcej szczegółowe, zasługujące na zaufanie informacje, dotyczące zgórą 130 eksplozyj wypadkowych. Na podstawie tych danych wykreślono w dużej skali krzywe, wykazujące najwyższe odległości, na których eksplozja danej ilości materjałów wybuchowych spowodowała większe uszkodzenie budynków. Za większe uszkodzenie budynku uważano zruszenie lub poważne uszkodzenie ścian fundamentalnych (zewnętrznych lub wewnętrznych), dachu, sufitu lub fundamentu. Wypadków wypadania szyb lub oberwania się tynku nie brano pod uwagę.

Na podstawie praktycznych danych, w pierwszym rzędzie praktyki wytwórni materjałów wybuchowych, przyjęto, że odpowiednia

osłona, naturalna lub sztuczna, pozwala na redukcję odległości o 50%. Po przestudjowaniu zgromadzonego materjału wykreślono nowe krzywe, określające, według zdania komisji, niebezpieczne strefy dla magazynów obwałowanych. Z wyjątkiem dwóch lub trzech wypadków, gdzie otrzymane informacje wzbudzały zresztą uzasadnione wątpliwości, wszystkie wykreślane w ten sposób krzywe przechodziły nazewnątrz od punktów, odpowiadających znacznemu zniszczeniu budowli podczas eksplozji faktycznych. Wychodząc z tych krzywych, komisja ułożyła tabelę odległości dla magazynów *obwałowanych* (p. tabelę Nr. 6) z tem, że w razie braku odpowiedniej osłony przy magazynie podane odległości winny być zwiększone dwukrotnie [30]).

Henry B. Faber, dziekan szkół pirotechnicznych Departamentu Uzbrojenia Amerykańskiej Armji, w książce swej „Military Pyrotechnics" [31]) podaje tabelę odległości, zalecaną przez amerykańskie towarzystwa ubezpieczeń od ognia (p. tabelę Nr. 7).

W tabeli tej obok rubryki materjałów wybuchowych, podana jest rubryka spłonek detonujących, a objekty zewnętrzne podzielone są na 3 klasy. Odległości, podane tu dla magazynów nieobwałowanych, są nieco niższe niż w poprzedniej tabeli (po przeliczeniu na magazyny nieobwałowane).

Kapitan służby uzbrojenia amerykańskiej armji John Albert Marshall w książce swej o fabrykacji i badaniu materjałów wybuchowych, stosowanych w wojsku [32]), podaje tabelę (p. tabelę Nr. 8), bardzo zbliżoną do tabeli amerykańskich towarzystw ubezpieczeń. Zasadnicza różnica polega na przyjęciu innego spółczynnika dla odległości do dróg publicznych: w tabeli tow. ubezpieczeń odległości te w porównaniu z odległościami do kolei żelaznych stanowią około 75%, tu — równe 50%.

Kpt. J. A. Marshall nie podaje pochodzenia przytoczonej przez niego tabeli, porównując ją jednak z tabelą, wydaną przez Departament Uzbrojenia Amerykańskiej Armji w 1924 r., należy przypuścić, że opracowana ona była w Departamencie Uzbrojenia i w następstwie tylko rozszerzona przez rozbicie tak materjałów niebezpiecznych jak i objektów zewnętrznych na większą ilość grup.

Ostatnią wreszcie tabelą, najpóźniejszą i najwięcej szczegółową, ze wszystkich przytoczonych, jest tabela Departamentu Uzbrojenia

---

[30]) p. C. Hall i S. P. Howell. Technical Paper 18. Washington 1912 r., s. 12.

[31]) p. Military Pyrotechnics by Henry B. Faber. Washington 1919 r., vol. 2, str. 273.

[32]) p. The manufacture and testing of military explosives by John Albert Marshall. New York. 1919.

Tabela Nr. 7 (amer. Tow. Ubezpieczeń).

Ilość w magazynie				Odległości w stopach do		
Spłonek detonujących sztuk		Materjałów wybuchowych funtów		domów mieszkalnych	kolei żelaznych	dróg publicznych
od	do	od	do			
1.000	5.000			30	20	15
5.000	10.000			60	40	30
10.000	20.000			120	70	50
20.000	25.000		50	200	120	80
25.000	50.000	50	100	240	140	100
50.000	100.000	100	200	360	220	140
100.000	150.000	200	300	520	310	200
150.000	200.000	300	400	640	380	260
200.000	250.000	400	500	720	430	290
250.000	300.000	500	600	800	480	320
300.000	350.000	600	700	860	520	340
350.000	400.000	700	800	920	550	360
400.000	450.000	800	900	980	590	380
450.000	500.000	900	1.000	1.020	610	400
500.000	750.000	1.000	1.500	1.060	640	420
750.000	1.000.000	1.500	2 000	1.200	720	480
1.000.000	1.500.000	2.000	3.000	1.300	780	520
1.500.000	2.000.000	3.000	4.000	1.420	850	570
2.000.000	2.500.000	4.000	5.000	1.500	900	600
		5.000	6.000	1.560	940	620
		6.000	7.000	1.610	970	640
		7.000	8.000	1.660	1.000	660
		8.000	9.000	1.700	1.020	680
		9.000	10.000	1.740	1.040	700
		10.000	20.000	1.780	1.070	710
		30.000	40.000	2.410	1.450	960
		40.000	50.000	2.680	1.610	1070
		50.000	60.000	2.920	1.750	1170
		60.000	70.000	3.130	1.840	1250
		70.000	80.000	3.310	1.990	1330
		80.000	90.000	3.460	2.080	1380
		90.000	100.000	3.580	2.150	1430
		100.000	200.000	3.670	2.200	1470
		200.000	300.000	4.190	2.510	1680
		300.000	400.000	4.670	2.800	1870
		400.000	500.000	5.110	3.070	2040

Amerykańskiej Armji z 1924 roku. Podana ona była w Nr. 2-3 1926 r. Przeglądu Artyleryjskiego w artykule „Przepisy bezpieczeństwa dla zakładów uzbrojenia w Stanach Zjednoczonych" [33]).

Wobec tego, że dla rozważań, przytoczonych w dalszym ciągu niniejszego artykułu, tabela ta posiada specjalnie ważne znaczenie, podaję ją w brzmieniu oryginalnem, t. j. w miarach angielskich (p. tabela Nr. 9) i osobno po przeliczeniu na miary metryczne (p. tabela

[33]) p. Przegl. Artyl. Nr. 2—3 1926 r., s. 119.

Tabela Nr. 8. (kpt. J. A. Marshall'a).

Ilość w magazynie				Odległości w stopach do		
Spłonek detonujących sztuk		Materjałów wybuchowych funtów		domów mieszkalnych	torów kolejowych	dróg publicznych
od	do	od	do			
1.000	5.000			30	20	10
5.000	10.000			60	40	20
10.000	20.000			120	70	35
20.000	25.000		50	145	90	45
25.000	50.000	50	100	240	140	70
50.000	100.000	100	200	360	220	110
100.000	150.000	200	300	520	310	150
150.000	200.000	300	400	640	380	190
200.000	250.000	400	500	720	430	220
250.000	300.000	500	600	800	480	240
300.000	350.000	600	700	860	520	260
350.000	400.000	700	800	920	550	280
400.000	450.000	800	900	980	590	300
450.000	500.000	900	1.000	1.020	610	310
500.000	750.000	1.000	1.500	1.060	640	320
750.000	1.000.000	1.500	2.000	1,200	720	360
1.000.000	1.500.000	2.000	3.000	1.300	780	390
1.500.000	2.000.000	3.000	4.000	1.420	850	420
2.000.000	2.500.000	4.000	5.000	1.500	900	450
2.500.000	3.000.000	5.000	6.000	1.560	940	470
3.000.000	3.500.000	6.000	7.000	1.610	970	490
3.500.000	4.000.000	7.000	8.000	1.660	1.000	500
4.000.000	4.500.000	8.000	9.000	1.700	1.020	510
4.500.000	5.000.000	9.000	10.000	1.740	1.040	520
5.000.000	7.500.000	10.000	15.000	1.780	1.070	530
7.500.000	10.000.000	15.000	20 000	1.950	1.170	580
10.000.000	12.500.000	20.000	25.000	2.110	1.270	630
12.500.000	15.000.000	25.000	30.000	2.260	1.360	680
15.000.000	17.500.000	30.000	35.000	2.410	1.450	720
17.500.000	20.000.000	35.000	40.000	2.550	1.530	760
		40.000	45.000	2.680	1.610	800
		45.000	50.000	2.800	1.680	840
		50.000	55.000	2.920	1.750	880
		55.000	60.000	3.030	1.820	910
		60.000	65.000	3.130	1.880	940
		65.000	70.000	3.220	1.940	970
		70.000	75.000	3.310	1.990	1.000
		75.000	80.000	3.390	2.040	1.020
		80.000	85.000	3.460	2.080	1.040
		85.000	90.000	3.520	2.120	1.060
		90.000	95.000	3.580	2.150	1.080
		95.000	100.000	3.630	2.180	1,090
		100,000	125.000	3.670	2.200	1.100
		125.000	150.000	3.800	2.280	1.140
		150.000	175.000	3.930	2,360	1.180
		175.000	200.000	4.060	2,440	1.220
		200.000	225.000	4.190	2.520	1.260
		225.000	250.000	4 310	2.590	1.300

Tabela Nr. 9. (Departament Uzbr. Amer. Armji).

Spłonek detonujących sztuk	Całkowita waga detonatorów w funt. ang	Całkowita waga zapaln. do granatów ręcznych w f. ang.	Całkowita waga bomb lotniczych i am. okopowej w f. ang.	Całkowita waga artyl. pocisków wybuch. w f. ang.	Waga netto mat. wyb. krusz. lub prochów dymnych w f. ang.	Waga netto prochów bezdymnych w f. ang.	Odległości w stopach do: pracowni fabrycznych	budynków mieszkalnych	linij kolejowych o ruchu osobowym	dróg publicznych	sąsiednich magazynów mat. wyb.	szpitali i szkół
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25.000	—	100	—	—	—	100	25	145	90	45	—	2.000
50.000	—	500	—	—	100	200	40	240	140	70	—	—
125.000	100	1.000	75	150	225	500	70	440	260	130	—	2.500
250.000	250	3.000	100	600	500	1.000	115	720	430	220	—	—
375.000	700	6.000	250	1.000	750	1.500	140	890	535	270	—	—
500.000	1.000	100.000	400	1.500	1.000	2.000	150	1.020	610	310	—	3.500
750.000	2.000	250.000	500	1.800	1.500	3.000	160	1.060	640	320	—	—
1.000.000	3.500	1.000.000	750	3.000	2.000	4.000	180	1.200	720	360	—	—
1.500.000	5.000	2.000.000	1.250	4.000	3 000	6.000	200	1.300	780	390	—	4.000
2.500.000	10.000	—	2.750	7.000	5.000	10.000	225	1.500	900	450	—	4.300
3.750.000	16.500	—	4.500	9.500	7.500	15.000	250	1.635	985	500	—	—
5.000.000	25.000	—	8.500	15.000	10.000	25.000	310	1,740	1.040	520	—	5.000
10 000.000	40.000	—	20.000	30.000	20.000	50.000	350	1.950	1.170	580	—	—
12.500.000	75.000	—	30.000	50.000	25.000	60.000	365	2.110	1.270	630	—	6.500
20.000.000	125.000	—	65.000	100.000	40.000	90.000	380	2.550	1.500	760	200	8.000
—	200.000	—	110.000	150.000	60.000	125.000	450	3,030	1.820	910	220	9.500
—	400.000	—	250.000	300.000	100.000	250.000	550	3.630	2.180	1.090	235	12.000
—	700.000	—	300.000	375.000	150.000	350.000	575	3.800	2.280	1.140	250	15.000
—	1.000.000	—	400.000	500.000	200.000	450.000	600	4.060	2.440	1.220	300	16.000
—	1.500.000	—	500.000	—	250.000	550.000	650	4.310	2.590	1.300	350	18.000

O ile magazyn jest odpowiednio obwałowany lub posiada osłonę naturalną, odległości podane w powyższej tabeli mogą być zredukowane na połowę.

Tabela Nr. 9 a. (Dep. Uzbr. Amer. Armji).

(w miarach metrycznych, z zaokrągleniem do całych kg i m).

Spłonek detonujących sztuk	Całkowita waga detonatorów w kg	Całkowita waga zapaln. do granatów ręcznych w kg	Całkowita waga bomb lotniczych i am. okopowej w kg	Całkowita waga artyl. pocisków wybuch. w kg	Waga netto mat. wyb. krusz. lub prochów dymnych w kg	Waga netto prochów bezdymnych w kg	Odległości w metrach do: pracowni fabrycznych	budynków mieszkalnych	linij kolejowych o ruchu osobowym	dróg publicznych	sąsiednich magazynów mat. wyb.	szpitali i szkół
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25.000	—	45	—	—	—	45	7,5	44	27	14	—	610
50.000	—	227	—	—	45	91	12	73	43	21	—	—
125.000	45	455	34	68	114	227	21	134	79	40	—	762
250.000	114	1.364	45	273	227	455	35	220	131	67	—	—
375.000	318	2.727	114	455	341	682	43	271	163	82	—	—
500.000	455	45.455	182	682	455	909	46	311	186	94	—	1.067
750.000	909	113.636	227	818	682	1.364	49	323	195	98	—	—
1.000.000	1.591	454.545	341	1.364	909	1.818	55	366	220	110	—	—
1.500.000	2.273	909.090	568	1.818	1.364	2.727	61	396	238	119	—	1.220
2 500.000	4.545	—	1.250	3,182	2.273	4.545	69	457	274	137	—	1.311
3.750.000	7.500	—	2.045	4.318	3.409	6.818	76	500	300	152	—	—
5 000.000	11.364	—	3.863	6,818	4.545	11.364	94	530	317	159	—	1 524
10.000.000	18.182	—	9.091	13.636	9.091	22.727	107	595	357	177	—	—
12.500.000	34.091	—	13.636	22.727	11.364	27.273	111	643	387	192	—	1.982
20.000.000	56.818	—	29.545	45.455	18.182	40.909	116	777	457	232	61	2.439
—	90.909	—	50,000	68.182	27.273	56.818	137	924	555	277	67	2.896
—	181.818	—	113.636	136.364	45.455	113.636	168	1.107	665	332	72	3.659
—	318.182	—	136.364	170.455	68.182	159.091	175	1.159	695	347	76	4.573
—	454.545	—	181.818	227.273	90.909	204.545	183	1 238	744	372	91	4.878
—	681 818	—	227.273	—	113.636	250.000	198	1.314	790	396	107	5.488

Nr. 9a). Pozwoli to czytelnikowi łatwiej sprawdzać przytoczone rozumowania, czynić samodzielne porównania i wyciągać własne wnioski.

Z powyższego, aczkolwiek niekompletnego, wykazu przepisów i tabel zagranicznych widzimy, że prawie każde państwo, a często kroć i różne prowincje jednego państwa posiadają swe nieco odmienne przepisy. Już same podstawy ustalenia obowiązujących odległości były niejednakowe. We Francji i Belgji na podstawie dokonanych prób dla obliczenia odległości przyjęto wzór orjentacyjny: $d = k\sqrt{c}$. W praktyce w każdym poszczególnym wypadku odległości są wyznaczane przez specjalne fachowe komisje, w zależności od warunków lokalnych. Wzór $d = k\sqrt{c}$ znalazł zastosowanie i w Z. S. S. R. spółczynnikowi k nadano tam jednak inne wartości niż we Francji.

W Anglji i w Stanach Zjednoczonych opracowano tabele na podstawie skutków, stwierdzonych przy eksplozjach wypadkowych.

Przy magazynach obwałowanych lub posiadających osłony naturalne jedne przepisy zezwalają na redukcję odległości do połowy (przepisy amerykańskie, francuskie, angielskie i italskie), wyjątkowo do jednej czwartej (przepisy angielskie), inne do $^1/_{5,75}$ (Z. S. S. R.); pozostałe zaś przepisy, zezwalając na redukcję, nie podają norm tej redukcji.

Strefy bezpieczeństwa, obowiązujące w poszczególnych krajach przy przechowywaniu materjałów wybuchowych, różnią się między sobą czasami bardzo znacznie. W wielu krajach inne strefy obowiązują przy magazynach przemysłowych, a inne przy wojskowych.

Również odmienny jest w tabelach różnych krajów podział zagrożonych objektów zewnętrznych na grupy, co niejednokrotnie utrudnia porównanie stref bezpieczeństwa, obowiązujących w dwóch poszczególnych krajach.

Przejdźmy teraz do szczegółowej analizy przytoczonych przepisów i do rozważań, jaki podział materjałów niebezpiecznych i objektów zagrożonych należy przyjąć u nas i jakie strefy bezpieczeństwa wyznaczyć dla każdej grupy.

Za punkt wyjściowy biorę z jednej strony materjały wybuchowe kruszące, a z drugiej — domy mieszkalne (pojedyńcze). Rubryki te znajdujemy we wszystkich przytoczonych przepisach i tabelach zagranicznych. Po ustaleniu odległości do domów mieszkalnych przejdziemy do podziału objektów zewnętrznych na grupy i ustalania odległości do każdej z tych grup przy danych ilościach materjałów wybuchowych.

Tabela Nr. 10 (porównawcza).
Obowiązujące odległości pomiędzy magazynami mat. wybuchowych a pojedyńczemi domami mieszkalnemi.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg	Obowiązujące odległości do pojedyńczych budynków mieszkalnych — w metrach														
	We Francji (z wzoru $d=5\sqrt{c}$)	W Austrji		W Prusach		W Bawarji	W Z. S. S. R.		W Italji	W Anglji		W Stan. Zjedn. A. P.			Proponowane polskie
		w/g przepisów z przed 1910 r.	w/g przepisów z 1910 r.	podług Escalesa	podług Halla		z wzoru $d=11\sqrt{c}$	w składach wojskowych		bez zgody właścicieli domów	ze zgodą właścicieli domów	stanu Massachusetts	związku kolei amer.	Dep. Uzbr. ameryk. armji	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	35	100	100	100	100	100	77	43	—	—	—	100	110	80	80
100	50	100	100	150	100	250	110	43	—	—	—	150	180	125	120
250	80	500	300	150	150	250	176	85	70	100	50	200	250	225	200
500	112	500	300	250	150	500	246	85	70	150	75	300	340	315	300
1.000	158	1.000	300	250	300	500	348	85	100	200	100	400	400	370	380
2.500	250	1.000	500	500	300	1.000	550	128	175	300	125	550	500	460	460
5.000	354	1.000	750	500	300	1.000	778	128	200	500	170	700	600	550	550
10.000	500	1.000	—	—	—	—	1.100	128	200	850	245	1.000	700	600	620
20.000	705	—	—	—	—	—	1.550	427	300	1.500	400	1.600	900	800	800
40.000	1.000	—	—	—	—	—	2.200	427*)	500	2.800	700	3.000	1.100	1.050	1.050
60.000	1.220	—	—	—	—	—	2.695	427*)	500	—	—	—	1.200	1.100	1.150
90.000	1.500	—	—	—	—	—	3.300	—	—	—	—	—	1.300	1.220	1.250
110 000	1.660	—	—	—	—	—	3.650	—	—	—	—	—	1.350	1.300	—
225 000	2.370	—	—	—	—	—	5.220	—	—	—	—	—	1.700	—	—
450 000	3.350	—	—	—	—	—	7.370	—	—	—	—	—	2.100	—	—

*) Magazyny obwałowane.

Liczby podano w tabeli z zaokrągleniem. Liczby, podane w rubrykach 11 do 15, otrzymano z interpolacji odnośnych tabel. Liczby rubryki 14 otrzymano przez podwojenie liczb tabeli związku kolei amer., obliczonej na magazyny obwałowane. Odległości, podane w tabelach Amer. Tow. Ubezp. i kpt. Marshalla, nie przytoczono w zestawieniu, gdyż są one bardzo zbliżone lub identyczne z odległościami tabeli Departamentu Uzbrojenia Amer. Armji.

Druga część zadania polegać będzie na podziale materjałów niebezpiecznych na pewną ilość grup w zależności od ich własności chemicznych i wybuchowych i ustalenie dla każdej grupy dopuszczalnych do magazynowania ilości przy danych strefach bezpieczeństwa.

W tabeli Nr. 10 zestawiono obowiązujące, względnie zalecone, w różnych krajach odległości pomiędzy magazynami materjałów wybuchowych a pojedyńczemi domami mieszkalnemi. W rubryce 16 tej tabeli podaję odległości, które, zdaniem mojem, należałoby przyjąć u nas. Są one prawie identyczne z odległościami, zaleconemi przez Dep. Uzbr. Amer. Armji.

Przy magazynach pojemności do 1.000 kg proponowane odległości są nieco wyższe, niż to wypływa z wzoru $d = 10\sqrt{c}$, t. j. wychodzą nawet poza strefę zniszczenia średniego. Wydaje się to jednak celowe z tego względu, że w małych magazynach prędzej można oczekiwać wypadkowej eksplozji niż w dużych, gdyż warunki przechowywania są tu zwykłe gorsze, przepisy bezpieczeństwa i kontrola materjałów mniej ściśle przestrzegane, dostęp dla osób postronnych łatwiejszy i t. p.

Przy magazynach pojemności ponad 1.000 kg do 40.000 kg proponowane odległości, według danych francuskich, nie zabezpieczają od zniszczeń średnich (są większe od $5\sqrt{c}$, ale mniejsze od $10\sqrt{c}$), dla pojedyńczych domów jest to jednąk dopuszczalne i we Francji.

Przy magazynach pojemności 60 i 90 tonn proponowane odległości są mniejsze od $5\sqrt{c}$, t. j. nie zabezpieczają jakoby od zniszczeń wielkich.

Należy jednak uwzględnić, że wzór $d = k\sqrt{c}$, jak wspomniano wyżej, wyprowadzono z prób detonacji stosunkowo małych ładunków wybuchowych, a z ekstrapolacji, jak wiadomo, nie zawsze otrzymuje się miarodajne liczby. Odległości zaś, przyjęte przez komisje amerykańskich wytwórni prochowych, oparte są na praktycznych danych, otrzymanych przy stu kilkudziesięciu dużych eksplozjach wypadkowych. Przytoczony wyżej przykład detonacji w 1924 r. we Francji 10 tonn melinitu również potwierdza słuszność stanowiska komisyj amerykańskich. Odporność domów naszych na falę wybuchową, należy przypuszczać, jest nie mniejsza niż domów amerykańskich. Wprawdzie wiejskie domy nasze są przeważnie drewniane, ale niskie, o dość solidnych ścianach, podczas gdy w Stanach Zjednoczonych są one jedno lub dwupiętrowe i przeważnie dość delikatnej budowy.

W rubryce 16-ej podano proponowane odległości przy załadowaniu magazynów od 50 kg do 90.000 kg. Za najwyższe jednak normalne załadowanie poszczególnych magazynów należałoby przyjąć 60.000 kg materjałów wybuchowych. Odpowiadałoby to normom, przyjętym we Francji, Italji i Z. S. S. R. (w składnicach wojskowych Z. S. S. R. przy warunku obwałowania magazynów). W Anglji najwyższe dopuszczalne załadowanie wynosi 45.500 kg, Reichsanstalt zaleca budowę magazynów o pojemności 30.000 kg. Załadowanie ponad 60.000 kg dopuszczają tylko tabele amerykańskie. Odległości proponowane dla magazynów o załadowaniu 90.000 kg, należy więc traktować raczej jako orjentacyjne dla pewnych wyjątkowych wypadków.

Przechodząc do innych objektów zewnętrznych, poza pojedyńczemi domami mieszkalnemi, widzimy, że najwięcej różniczkują je tabele: angielska, italska i Departamentu Uzbrojenia Amer. Armji. Dzielą one te objekty na 6 do 8 grup, podczas gdy pozostałe tabele dzielą je tylko na 2—3 grupy.

Przy proponowanym poniżej podziale tych objektów na grupy i wyznaczaniu do nich odległości przy danem załadowaniu magazynów wzoruję się w pierwszym rzędzie na tabeli Departamentu Uzbrojenia Amer. Armji, dostosowując podział do naszych warunków i w celu zredukowania niedomówień do minimum, dzieląc zagrożone objekty na 10 grup. Pierwszą grupę stanowią omówione wyżej pojedyncze domy mieszkalne. Do grupy drugiej zaliczam tory kolei żelaznych, drogi lądowe uczęszczane i drogi wodne o ruchu osobowym.

Przepisy austrjackie, pruskie, bawarskie i niemieckie wojskowe wyznaczają odległości do kolei żelaznych takie same jak i do domów mieszkalnych, przepisy wojskowe Z.S.S.R. — dwa do trzech razy większe. Natomiast w tabeli italskiej odległości te stanowią 75 do 30%. odległości od pojedyńczych domów mieszkalnych, a w tabeli angielskiej około 50% odległości od domów, których właściciele nie zgodzili się na redukcję odległości i około 200% odległości do domów z zezwoleniem właścicieli na redukcję. Ponadto tabela angielska podaje inne odległości do kolei, a inne, dwukrotnie niższe, do dróg lądowych i wodnych.

W tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji do torów kolejowych wyznaczono dowolnie odległości o 40% niższe niż do pojedyńczych domów mieszkalnych, wychodząc z założenia, że wagony kolejowe są niższe, o mniejszej powierzchni i dlatego więcej odporne na wstrząsy niż budynki mieszkalne i że domy są wystawione na ryzyko stale, pod-

czas gdy obecność pociągów na zagrożonym odcinku jest tylko dorywcza.

Uznając słuszność powyższych motywów, odległości do kolei i dróg uczęszczanych przyjmuję w proponowanej tabeli w wysokości również około 40% niższej niż odległości do domów mieszkalnych. Tabela Nr. 11 podaje te odległości porównawczo z odległościami, obowiązującemi w innych krajach. Pomijając przestarzałe przepisy austrjackie, pruskie, bawarskie i Z. S. S. R., przepisom angielskim i amerykańskim, proponowane odległości mniej więcej odpowiadają, przewyższając znacznie odległości, przyjęte w Italji.

W trzecią grupę objektów zewnętrznych wydzielam drogi mało uczęszczane. Do grupy tej zaliczam również budynki niemieszkalne, w których ludzie przebywają tylko dorywczo (stodoły, nieczynne zakłady przemysłowe, mało ruchliwe składnice tanich a bezpiecznych materjałów i t. p.).

Tabela Nr. 11 (porównawcza)

Odległości od magazynów mat. wybuchowych do torów kolejowych.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg.	Obowiązujące odległości do kolei w metrach											
	w Austrji		w Prusach		W Bawarji	W składach wojsk. Z.S.S.R.	W Italji	W Anglji	w Stanach Zjedn.			Proponowane polskie
	w/g przepisów z przed 1910 r.	w/g przepisów z 1910 r.	Podług Escalesa	Podług Halla					stanu Massachusetts	związku kolei amer.	Dep. Uzbr. Amer. Armji	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	100	100	100	100	100	213	—	—	50	70	50	50
100	100	100	150	100	250	213	—	—	75	100	75	75
250	500	300	150	150	250	213	50	100	100	150	140	120
500	500	300	250	150	500	213	50	150	150	200	190	180
1.000	1.000	300	250	300	500	213	75	200	180	240	225	220
2.500	1.000	500	500	300	1.000	213	100	210	210	300	280	280
5.000	1.000	750	500	300	1.000	854	100	250	250	340	320	330
10.000	1.000	—	—	—	—	854	100	310	310	400	360	380
20.000	—	—	—	—	—	854	100	440	400	520	480	480
40.000	—	—	—	—	—	854*)	150	700	700	640	640	640
60.000	—	—	—	—	—	854*)	175	—	—	700	680	700
90.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	760	740	800

*) Magazyny obwałowane.

Przepisy pruskie, bawarskie, italskie, stanu Massachusetts i związku kolei amerykańskich odpowiedniej rubryki nie posiadają. Natomiast przepisy austrjackie wydzielają rubrykę dróg mało uczęszczanych, a przepisy Z. S. S. R., angielskie, amerykańskich towa-

rzystw ubezpieczeń i Dep. Uzbr. Amer. Armji — rubrykę dróg publicznych, do których obowiązują odległości mniejsze niż do torów kolejowych.

Wzorując się na tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji, przyjmuję tu odległości o 50% mniejsze niż do torów kolejowych. Tabela Nr. 12 podaje te odległości porównawczo z odległościami, zaleconemi w Austrji, Z. S. S. R., Anglji i Stanach Zjednoczonych. Proponowane odległości są prawie identyczne z odległościami, zaleconemi do gościńców w tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji, i wyższe od obowiązujących w Anglji odległości do traktów i kanałów.

W czwartą grupę objektów zewnętrznych wydzielam osiedla skupione o ludności ponad 500 osób. Odległości proponuję tu 2 razy wyższe niż do pojedyńczych domów mieszkalnych.

Tabela Nr. 12 (porównawcza).
Odległości od magazynów mat. wybuchowych do dróg publicznych.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg.	Obowiązujące odległości do dróg w metrach						Proponowane polskie
	w Austrji		W składach wojsk. Z. S. S. R.	W Anglji	w Stanach Zjedn.		
	w/g przepisów z przed 1910 r.	w/g przepisów z 1910 r.			Amer. Tow. Ubezp.	Dep. Uzbr. Amer. Armji	
1	2	3	4	5	6	7	8
50	100	100	43	—	35	25	25
100	100	100	43	—	50	40	40
250	200	200	85	50	90	70	60
500	200	200	85	75	125	100	90
1.000	300	200	85	90	150	110	115
2.500	500	300	128	95	190	140	140
5.000	500	400	128	100	210	160	165
10.000	500	—	128	110	230	180	190
20.000	—	—	427	130	350	240	240
40.000	—	—	427*)	175	420	320	320
60.000	—	—	427*)	—	440	340	350
90.000	—	—	—	—	450	370	400

*) Magazyny obwałowane.

Przepisy francuskie do domów skupionych nakazują odległości co najmniej równe 10 $\sqrt{c}$, t. j. dwukrotnie wyższe niż do domów pojedyńczych. Przepisy austrjackie, pruskie, bawarskie, angielskie i amerykańskie nie wydzielają osiedli skupionych w osobną grupę.

Obowiązuje tu widocznie zachowanie odległości do skrajnych domów jak przy pojedyńczych domach mieszkalnych (których właściciele nie dali zezwolenia na redukcję odległości).

Niemiecka instrukcja 1918 r. dla wojskowych składnic amunicyjnych zaleca zachowanie odległości do wsi trzykrotnie wyższych niż do domów pojedyńczych (do wsi — 750 m, do pojedyńczych domów — 250 m). Składnice wojskowe Z. S. S. R. obowiązuje zachowanie większych odległości od granic miejskich. Tabela italska podaje 3 rubryki odległości do osad i miast; odległości te są różne, w zależności od zaludnienia sąsiadujących z magazynem osad.

Tabela Nr. 13 (porównawcza).
Odległości od magazynów do osiedli skupionych.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg.	Obowiązujące odległości do osiedli w metrach			
	we Francji ($10\sqrt{c}$)	w skł. wojsk. Z. S. S. R.	w Italji	Proponowane polskie
1	2	3	4	5
50	70	—	—	160
100	100	—	—	240
250	160	—	150	400
500	224	854	200	600
1.000	316	854	200	750
2.500	500	854	300	900
5.000	707	854	500	1.100
10.000	1.000	854	500	1.250
20.000	1.410	1600	1.000	1.600
40.000	2.000	1600*)	1.500	2.100
60.000	2.440	1600*)	2.000	2.300
90.000	3.000	—	—	2.500

*) Magazyny obwałowane.

Tabela Nr. 13 podaje proponowane odległości porównawczo z odległościami, zalecanemi we Francji, Z. S. S. R. i w Italji.

Przy magazynach pojemności 40 tonn i niżej proponowane odległości są wyższe, niż to wypływa ze wzoru $10\sqrt{c}$, nadwyżkę tę jednak, szczególnie przy małych magazynach, uważam za pożądaną, ze względów, wyłuszczonych wyżej przy omawianiu odległości do pojedyńczych domów mieszkalnych.

Poza tem określenie, podane w przepisach francuskich — „skupienia domów" (agglomérations), do których zalecono odległości równe $10\sqrt{c}$, jest niezupełnie ścisłe i może być interpretowane rozmaicie. Jedna komisja pod „skupieniem" będzie rozumiała kilka domów, rozmieszczonych w pobliżu jeden od drugiego i zamieszkałych przez kilkanaście lub kilkadziesiąt osób, druga komisja — domy, rozrzucone na krańcach miasta, zaliczy do domów pojedyńczych, a za skupienia, do których obowiązuje odległość $10\sqrt{c}$, będzie uważała dopiero ulice gęsto zabudowane.

W piątą grupę objektów zewnętrznych wzorem tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji wydzielam szkoły i szpitale. Do grupy tej włączam również radjostacje nadawcze, kościoły, teatry i duże dworce kolejowe.

Większość przytoczonych wyżej przepisów państw obcych objekty te pomija milczeniem. Przepisy italskie wspominają o kościołach, wyznaczają jednak do nich ze względów dla mnie niezrozumiałych, odległości mniejsze niż do osad o 500 mieszkańcach. W tabeli angielskiej teatry i inne miejsca zgromadzeń, przytoczone są w tejże rubryce, co i pojedyńcze domy mieszkalne, właściciele których nie zgodzili się na redukcję odległości. Jedynie przepisy Dep. Uzbr. Amer. Armji wydzielają w osobną rubrykę szkoły i szpitale i wyznaczają do nich odległości przeciętnie 3 lub 4-krotnie wyższe niż do domów pojedyńczych.

Wydzielenie szkół, teatrów, kościołów i t. p. w osobną grupę i wyznaczenie do nich odległości większych wydaje mi się zupełnie słusznem, gdyż przy objektach tych należy się liczyć, nie tyle z uszkodzeniami materjalnemi budynków, ile z wstrząsem moralnym zebranych tam osób i z możliwością paniki, w razie większego huku i wysadzenia bodaj kilku szyb w oknach przy ewentualnej eksplozji pobliskiego magazynu.

Aby nie utrudniać zbytnio budowy składnic materjałów wybuchowych, można zaliczyć do tej grupy nie wszystkie, a tylko większe objekty tego rodzaju, jak naprz. szkoły o 200 i więcej uczniach, teatry o ilości miejsc ponad 300 i t. d. Do objektów omawianej grupy proponuję odległości zbliżone do podanych w tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji. Są one $1\frac{1}{2}$ do 3 razy większe niż do osiedli skupionych.

Do 6-ej wreszcie i ostatniej grupy objektów zewnętrznych proponuję zaliczyć cenne zabytki architektoniczne i siedziby Najwyższych Władz Państwowych, wzorując na ostatniej grupie objektów tabeli angielskiej, wyznaczającej największe odległości do pałaców królewskich.

Mam tu na myśli zabytki architektoniczne i pałace, posiadające cenne a kruche upiększenia zewnętrzne, witraże lub t. p., które mogłyby ulec uszkodzeniu przy eksplozji pobliskiego magazynu. Zabytków tych mamy stosunkowo niewiele, przypuszczam więc, że zachowanie do nich większych odległości nie powinno nastręczyć specjalnych trudności. Proponuję tu odległości 2 razy większe niż do objektów poprzedniej grupy. Zabytki, nie posiadające łamliwych upiększeń, i pałace rządowe mniej ważne, można zaliczyć do grupy 5-ej (jak szkoły, kościoły i t. p.).

Przytoczona niżej tabela Nr. 14 wykazuje odległości, proponowane do objektów grupy 5-ej i grupy 6-ej, porównawczo z odległościami zbliżonych rubryk tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji i tabeli angielskiej.

Tabela Nr. 14 (porównawcza).
Odległości od magazynów do szkół, pałaców i t. p.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg	Odległości w metrach			
	do szkół i szpitali w/g tabeli Dep. Uzbr. Am. Armji	proponowane do szkół, teatrów, kościołów i t.p.	do pałaców królewskich w/g tabeli angielskiej	proponowane do zabytków i pałaców rządowych
1	2	3	4	5
50	610	500	3.200	1.000
100	762	750	3.200	1.500
250	762	750	3.200	1.500
500	1.100	1.000	3.200	2.000
1.000	1.200	1.200	3.200	2.500
2.500	1.350	1.500	3.800	3.000
5.000	1.600	1.800	4.600	3.500
10.000	1.800	2.000	6.000	4.000
20.000	2.500	2.500	8.800	5.000
40.000	3.500	3.000	14.400	6.000
60.000	4.500	3.500	—	7.000
90.000	4.800	4.000	—	8.000

Zkolei przechodzę do omówienia odległości wewnętrznych w składnicach materjałów wybuchowych, t. j. do odległości pomiędzy sąsiedniemi magazynami, jak również odległości do budynków pomocniczych w składnicach i do domów mieszkalnych personelu składnic. Źródła zagraniczne o odległościach tych podają dość skąpe wiadomości.

Berliński Reichsanstalt w swej opinji, wydanej Kierownictwu Marynarki niemieckiej, przy magazynach nieobwałowanych o pojemności 30 tonn zaleca rozmieszczanie ich w szachownicę i zachowanie między niemi odległości 50 metrów. Takąż odległość między magazynami zaleca niemiecka instrukcja z 1918 r. dla tyłowych składnic amunicyjnych (pojemność magazynów w instrukcji niepodana). W składnicach wojskowych Z. S. S. R. przy obwałowanych magazynach pojemności do 65.500 kg obowiązuje między niemi zachowanie odległości 53 m (25 sążni).

Przepisy francuskie przy magazynach, oddzielonych wałem, zalecają, jako minimalną, odległość między niemi $d = 2k\sqrt[3]{c} + e$, gdzie $k = 0{,}5$, c — ilość przechowywanego materjału wybuchowego w kg i e — grubość wału u podstawy w metrach.

Tabela angielska między sąsiedniemi magazynami jednej składnicy wyznacza odległości takież, jak między magazynami a drogami publicznemi.

W tabeli Nr. 15 podano zestawienie proponowanych odległości między magazynami dla nas a takich samych odległości podług tabeli angielskiej i tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji.

Tabela Nr. 15 (porównawcza).
Odległości między sąsiedniemi magazynami nieobwałowanemi.

Ilość mat. wyb. w magazynie w kg	Obowiązujące odległości między magazynami w metrach		
	w/g tabeli angielskiej	w/g tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji	proponowane
1	2	3	4
50	—	—	—
100	—	—	—
250	50	—	—
500	75	—	—
1.000	90	—	—
2.500	95	—	40
5.000	100	—	50
10.000	110	—	60
20.000	130	65	70
40.000	175	70	80
60.000	—	75	90
90.000	—	90	100

Dla magazynów pojemności poniżej 2.500 kg nie podaję odległości do magazynów sąsiednich, gdyż budowa kompleksu magazynów o tak małej pojemności niema racji bytu. W razie potrzeby wskazana jest raczej budowa jednego większego magazynu, podzielonego odpowiednio na komory i ewentualnie przy braku terenu obwałowanego.

Następne dwie grupy objektów zagrożonych (8-ą i 9-tą) stanowią wartownie i budynki administracyjne składnic. Do tej ostatniej grupy zaliczam również warsztaty podręczne składnic, garaże i t. p.

Według przepisów austrjackich z 1910 r. biura składnic, wartownie, jak również drogi i bocznice kolejowe, prowadzące do składnic, nie były zaliczane do objektów zagrożonych.

W składnicach wojskowych Z. S. S. R. zaleca się budować wartownie murowane, w odległości co najmniej 43 m (20 sążni) od magazynów, a wartownie drewniane — 128 m (60 sążni).

Przyjmując do wartowni odległości mniej więcej o 50% wyższe, niż między magazynami, a do budynków administracyjnych o 100% wyższe, otrzymujemy strefy zbliżone do norm. zaleconych tabelą Dep. Uzbr. Amer. Armji i tabelą angielską dla pracowni fabrycznych (p. tabela Nr. 16).

Tabela Nr. 16 (porównawcza).
Odległości do wartowni i budynków administracyjnych składnic.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg	Proponowane odległości do wartowni	Proponowane odległości do budynków admin.	Odległości do pracowni fabrycznych w/g tabeli Dep. Uzbr. Am. Armji	Odległości do warsztatów i budynków fabrycznych w/g tabeli angielskiej
	w metrach			
1	2	3	4	5
50	50	50	12	—
100	50	50	20	—
250	50	50	40	50
500	60	60	48	75
1.000	60	80	56	90
2.500	70	90	70	95
5.000	80	100	95	100
10.000	90	120	110	110
20.000	105	140	120	130
40.000	120	160	160	175
60.000	135	180	170	—
90.000	150	200	180	—

Proponowane odległości nie zabezpieczają od dużych uszkodzeń w razie eksplozji magazynu. Wobec tego, o ile to nie utrudnia nad-

miernie pracy składnicy, pożądane jest odsunięcie budynków administracyjnych dalej od magazynów, niż to podaje tabela. Licząc nawet, że pracownicy administracji składnic mogą być wystawiani na niebezpieczeństwo zawodowe narówni z robotnikami w warsztatach i pracowniach fabrycznych, to jednak przyjęcie dla budynków administracyjnych odległości nieco większych niż dla pracowni fabrycznych, byłoby wskazane choćby z tego względu, że w pracowniach materjałów wybuchowych liczba pracowników jest zwykle ograniczona do pewnego niezbędnego minimum, a w budynkach administracji składnic — nie.

W ostatnią wreszcie grupę objektów zagrożonych wydzielam domy mieszkalne administracji składnic. Ze względów administracyjnych pożądane byłoby, aby domy te były możliwie blisko od zarządów składnic, względy zaś bezpieczeństwa przemawiają za odsunięciem ich jak najdalej od magazynów. Odległości do domów tych, jako mniej ściśle związanych z czynnościami składnic, przyjmuję 2 do 4-krotnie wyższe niż do budynków administracyjnych.

Proponowane odległości, podane w tabeli Nr. 17, zbliżone są do odległości, nakazanych przez przepisy italskie do domów mieszkalnych pojedyńczych.

Tabela Nr. 17 (porównawcza).
Odległości do domów mieszkalnych personelu składnic.

Ilość mat. wyb. w magazynie nieobwałowanym w kg	Odległości w metrach			
	do domów mieszkalnych w/g przepisów Z.S.S.R dla skł. wojskowych	do domów ze zgodą właścicieli w/g tabeli angielskiej	do domów pojedyńczych w/g tabeli włoskiej	proponowane
1	2	3	4	5
50	43	—	—	80
100	43	—	—	100
250	85	50	70	100
500	85	75	70	120
1.000	85	100	100	120
2.500	128	125	175	150
5.000	128	170	200	200
10.000	128	245	200	240
20.000	427	400	300	300
40.000	427 *)	700	500	500
60.000	427 *)	—	500	600
90.000	—	—	—	800

* Magazyny obwałowane.

Odległości, proponowane do domów mieszkalnych administracji i budynków administracyjnych składnic, nie dają dostatecznego zabezpieczenia, należy więc budynkom tym nadawać możliwie solidną konstrukcję i dążyć do zalesienia przestrzeni pomiędzy niemi a magazynami, aby zwiększyć przez to bezpieczeństwo osób, przebywających w omawianych budynkach.

W ten sposób rozpatrzyliśmy sprawę odległości pomiędzy magazynami materjałów wybuchowych a zagrożonemi objektami zewnętrznemi i wewnętrznemi, podzielonemi na 10 grup według ich ważności i przeznaczenia.

Przejdźmy teraz do rozpatrzenia kwestji, czy podanie w tabeli odległości jednej tylko rubryki — materjały wybuchowe — jest wystarczające i czy nie jest wskazany podział na grupy również materjałów wybuchowych i amunicji.

Każdemu, nieco bliżej obznajmionemu z materjałami wybuchowemi i amunicją, wiadomo, że efekt wybuchu a szczególnie pożaru materjałów wybuchowych kruszących a prochów, jak również amunicji tego lub innego rodzaju, opakowanej lub nie, jest niejednakowy. Przy jednych materjałach zagraża tylko bardzo silny pożar lub eksplozje pojedyńczych skrzynek, przy innych — należy się liczyć z możliwością masowej detonacji całej zawartości magazynu. Eksplozja materjałów wybuchowych lub prochów wywołuje zniszczenie głównie przez falę wybuchową, przy eksplozji amunicji dochodzi działanie rozpryskowe odłamków amunicji, względnie przy wielkich eksplozjach rozrzucanie na duże odległości całych pocisków, mogących detonować pojedyńczo przy zderzeniu z ziemią lub sąsiednim budynkiem.

Badania, dokonane we Francji w 1902—1904 r., wykazały, że promień działania fali wybuchowej przy eksplozji prochu dymnego jest prawie 1,5 raza mniejszy niż przy eksplozji materjałów wybuchowych kruszących.

Przepisy austrjackie z przed 1910 r. wyznaczały inne strefy bezpieczeństwa dla materjałów wybuchowych kruszących, a inne — mniejsze — dla prochów.

Przepisy austrjackie z 1910 r. dzielą materjały niebezpieczne na 3 grupy — materjały wybuchowe, amunicję działową i amunicję małokalibrową i dla każdej z tych grup podają inne strefy bezpieczeństwa.

Przepisy bawarskie dzielą materjały wybuchowe na 3 klasy w uwzględnieniu siły wybuchowej i wrażliwości poszczególnych materjałów na impulsy mechaniczne.

Tabela angielska robi różnicę między materjałami wybuchowemi kruszącemi, prochami i wyrobami pirotechnicznemi, zezwalając przy jednakowych strefach bezpieczeństwa na magazynowanie tych materjałów w ilościach, odpowiadających mniej więcej stosunkowi 1 : 2 : 4.

Podział materjałów niebezpiecznych na grupy uwzględniony jest najszerzej w tabeli Dep. Uzbr. Amerykańskiej Armji z 1924 r. — znajdujemy tu już 7 takich grup, obejmujących materjały wybuchowe kruszące, prochy, spłonki, elementy amunicji i gotową amunicję rozmaitych rodzajów.

Podział ten, jak można sądzić z tabeli, oparty jest głównie na mniejszej lub większej skłonności materjałów danej grupy do eksplozji w razie pożaru i na efekcie takiej eksplozji. Brak takiego podziału w większości przytoczonych tabel państw obcych tłumaczy się tem, że wydane one były przez władze cywilne dla celów przemysłowych, dla składnic przy wytwórniach, kopalniach i t. p., a nie dla składnic wojskowych, magazynujących najrozmaitsze rodzaje materjałów wybuchowych i amunicji.

Wychodząc z założenia, że zróżniczkowanie materjałów niebezpiecznych w tabeli odległości jest bezwzględnie wskazane, poniżej czynię próbę podziału ich na grupy. Wzoruję się przytem na tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji, w przystosowaniu się jednak do naszych warunków, grupuję materjały nieco odmiennie.

Do grupy materjałów wybuchowych kruszących, dla której ustaliliśmy wyżej strefy bezpieczeństwa, proponuję zaliczyć również amunicję wybuchową saperską, granaty ręczne zaczepne, prochy bezdymne drobnoziarniste i porowate i prochy dymne.

Amunicja wybuchowa saperska i granaty ręczne zaczepne, jak wiadomo, zawierają zwykle materjały wybuchowe kruszące w otoczce z cienkiej blachy. Niebezpieczeństwo przechowywania i skutki ewentualnej eksplozji są przy nich mniej więcej takie same, jak przy odnośnych materjałach wybuchowych luźnych.

Prochy bezdymne, drobno zmielone, w stanie suchym są materjałem wybuchowym kruszącym i posiadają wszelkie właściwości materjałów kruszących.

Prochy bezdymne porowate (myśliwskie, ćwiczebne i t. p.) mogą się spalać, łatwo jednak przy pożarze eksplodują. Przepisy niemieckie z 1929 r. podają specjalnie zaostrzone warunki produkcji i magazynowania tych prochów [34]).

---

[34]) p. Wiadomości Techn.-Artyl. Nr. 5 z kwietnia 1930 r., str. 614.

Prochy bezdymne drobnoziarniste do amunicji małokalibrowej są o wiele bezpieczniejsze, pożar jednak dużej ilości tych prochów może przeistoczyć się w eksplozję.

Prochy dymne przy zapaleniu zawsze i prawie momentalnie eksplodują w całej masie. Poza tem są one bardzo wrażliwe na impulsy mechaniczne, łatwo więc mogą się stać źródłem pożaru w składnicy. Przy pożarze magazynu z materjałami wybuchowemi kruszącemi detonacja, jeżeli wogóle następuje, to zwykle dopiero po pewnym czasie, po spaleniu się mniejszej lub większej ilości materjału. Skutki eksplozji są przez to często o wiele słabsze, niż to wypływa z teoretycznych obliczeń, przy danem załadowaniu magazynu. Przy prochach dymnych liczyć na podobne zachowanie się w razie pożaru nie można. Z tych względów, wzorem tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji, włączam prochy dymne do grupy materjałów wybuchowych kruszących, pomimo, że strefa zniszczenia przy eksplozji tych prochów jest prawie 1,5 raza mniejsza, niż przy eksplozji materjałów kruszących.

Przyjęcie przy prochach dymnych stref bezpieczeństwa obniżonych uważam za możliwe tylko wtedy, gdy w danej składnicy przechowuje się wyłącznie prochy dymne. Dla składnic wojskowych kwestja ta zresztą nie ma większego znaczenia, gdyż prochy dymne w technice wojskowej mają obecnie bardzo ograniczone zastosowanie.

Do drugiej grupy materjałów niebezpiecznych zaliczam prochy bezdymne działowe, nitrocelulozowe i nitroglicerynowe, jak również ładunki prochowe amunicji działowej niezespolonej, workowe i łuskowe. Włączam tu również wyroby pirotechniczne (amunicję świetlną i sygnałową).

Przy danych strefach bezpieczeństwa dopuszczam magazynowanie tych materjałów w ilościach dwukrotnie wyższych, niż materjałów grupy poprzedniej tak, jak to przyjęto w tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji.

Obniżone strefy bezpieczeństwa przy magazynach z prochami działowemi (kordytami) i wyrobami pirotechnicznemi widzimy również w tabeli angielskiej. W stosunku do wyrobów pirotechnicznych nie idę tak daleko, jak tabela angielska, gdyż skład chemiczny tych wyrobów ulega częstym zmianom. Dla pewnych poszczególnych gatunków uważam za możliwe dalsze obniżenie stref bezpieczeństwa, ale każdorazowo po szczegółowem wszechstronnem zbadaniu sprawy przez fachowe organa.

Pożar prochów bezdymnych i ładunków prochowych działowych

może dać eksplozję poszczególnych skrzynek, prawdopodobieństwo jednak masowej eksplozji całego magazynu jest prawie żadne [35]).

Jak podaje En. Że.[36]), proch bezdymny w ilości kilkuset kilogramów, złożony w stosie na podłodze, przy zapaleniu spala się cały tak szybko, że o gaszeniu go nie może być mowy. Wytwarzające się przytem gazy wysadzają drzwi i okna, ewentualnie podnoszą dach, pozostawiając zwykle w całości ściany budynku. Proch w opakowaniu niehermetycznem spala się bez wybuchu, przyczem płomień szybko przechodzi przez szpary od skrzynki do skrzynki. Jeżeli zapalić proch w skrzynce hermetycznej z otwartą pokrywą, to cała ilość jego, około 50 kg, spala się w ciągu 20 sekund, dając płomień stożkowaty, rozszerzający się ku górze, wysokości do 20 metrów. Paleniu się prochu towarzyszy syk gazów, wydobywających się ze skrzyni. Gazy te porywają ze sobą pewną ilość wstęg prochowych niespalonych, które dopalają się w powietrzu lub po opadnięciu na ziemię. Woda z sikawki lub piana z gaśnicy odrzucane są przez gazy i nie mogą przeniknąć do skrzyni. Blaszanka nie zdąża się rozlutować, a skrzynia drewniana nie zwęgla się. Wobec tego pożar jednej skrzyni prochu może nie zapalić sąsiednich skrzynek z prochem, zamkniętych hermetycznie.

Przy większym jednak ogniu pożar szybko przechodzi od skrzynki do skrzynki, i w końcu cała pozostała ilość prochu zapala się prawie jednocześnie. Przy pożarach w Rosji prochu bezdymnego w hermetycznem opakowaniu, tak w magazynach jak i na otwartem powietrzu, nie eksplodował on sam przez się nigdy. Jedyny wypadek eksplozji magazynu z prochem był spowodowany podczas pożaru w składnicy amunicyjnej przez wybuchy pocisków, wpadających do magazynu prochu.

Przy prochach tej grupy zachodzi więc zasadniczo niebezpieczeństwo tylko pożaru, eksplozja zaś może nastąpić jedynie w razie wybuchu w magazynie bomby lotniczej lub pocisku artyleryjskiego większego kalibru, przy ewentualnej eksplozji pobliskiego magazynu z amunicją.

Do trzeciej grupy materjałów niebezpiecznych zaliczam bomby lotnicze, amunicję okopową, granaty ręczne obronne, granaty karabinowe, wkrętki detonujące i t. p.

Amunicja ta, o stosunkowo dużych ładunkach wybuchowych, zagraża detonacją masową i uszkodzeniem sąsiednich objektów, tak przez falę wybuchową, jak i przez działanie odłamkami. Możliwe jest

---

[35]) p. Przegl. Artyl. Nr. 2—3, s. 146.
[36]) p. Wojna i Tiechnika. 1928 r. Nr. 1, s. 47.

również rozrzucanie na dalsze odległości całych pocisków i detonocja ich przy upadku. Amunicja tej grupy jest więcej niebezpieczna niż luźne materjały wybuchowe lub pociski działowe [37]).

Przy danych strefach bezpieczeństwa dopuszczam tu załadowania magazynów, zbliżone do podanych w tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji.

W czwartą grupę materjałów niebezpiecznych wydzielam pociski działowe (granaty wybuchowe) wszelkich kalibrów bez opakowania i amunicję artyleryjską kalibru 100 mm i wyżej w opakowaniu.

Amunicja ta, o stosunkowo mniejszych ładunkach wybuchowych, jest nieco więcej bezpieczna niż bomby lotnicze i amunicja okopowa, również jednak zagraża masową detonacją i rozrzucaniem pocisków, wybuchających przy upadku [38]).

Wzorem tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji załadowanie magazynów amunicją tej grupy dopuszczam nieco wyższe niż amunicją grupy poprzedniej.

Przy pożarze składnicy amunicyjnej marynarki amerykańskiej w Lake Denmark dnia 10.VII.1926 r. w sąsiednim arsenale Picatinny uszkodzone zostały wszystkie budynki. Uszkodzenia te jednak, jak podaje płk. W. Tschappat [39]), spowodowane były głównie przez fale wybuchowe. Odłamki szyn kolejowych i żelaznych konstrukcyj dachowych, setki kamieni z pod magazynów, w których zaszła eksplozja, jak również rozrzucone przez eksplozję pociski kalibru do 14 cali w porównaniu z falami wybuchowemi dały zniszczenie niewielkie.

Pewna ilość pocisków, rozrzuconych przez eksplozję w Lake Denmark na odległości do 2 kilometrów, przy upadku detonowała. Trudno przypuścić, aby miały w nich zfunkcjonować zapalniki lub, aby detonację ich mogło spowodować uderzenie przy upadku, raczej, zdaniem płk. Tschappata, należy przypuścić, że pociski te były silnie ogrzane przez ogień przed samą eksplozją magazynu, i że ładunki ich w chwili wyrzucenia pocisków przez eksplozję były doprowadzone do temperatury niewiele niższej od temperatury zapłonienia materjału wybuchowego ładunku. W tych warunkach wystarczał wstrząs przy spadku pocisku na ziemię, aby spowodować jego detonację.

Właściwość rozrzucania na duże odległości całych pocisków przy eksplozji magazynu i możliwość detonacji pojedyńczych, wyrzucanych przez eksplozję pocisków przy upadku ich na ziemię lub pobliski

---

[37]) p. Przegl. Artyl. Nr. 2—3 1926 r., s. 144.

[38]) p. Przegl. Artyl. Nr. 2—3 1926 r., s. 141 — 142.

[39]) p. Army Ordnance Nr. 38 z września—października 1926 r. s. 133 — 134.

magazyn, należy mieć na względzie zarówno przy rozplanowywaniu składnic, jak i przy magazynowaniu amunicji grupy trzeciej i czwartej. Nadanie dookoła magazynów z omawianą amunicją stref bezpieczeństwa takich, aby zabezpieczały one w zupełności sąsiednie objekty od pocisków, rozrzucanych przy eksplozji, przy naziemnych magazynach jest praktycznie niemożliwe. Zmniejszyć jednak niebezpieczeństwo można przez umiejętne rozplanowanie składnicy, z wyzyskaniem miejscowych warunków terenowych i przez celowe rozmieszczanie materjałów niebezpiecznych w poszczególnych magazynach.

Do następnej grupy zaliczam amunicję artyleryjską kalibru poniżej 100 mm w opakowaniu, szrapnele wszelkich kalibrów w opakowaniu lub bez, amunicję małokalibrową specjalną do wstrzeliwania (smugową i t. p.) i lonty detonujące. Strefy bezpieczeństwa proponuję tu stosunkowo bardzo nieznaczne (p. tabela Nr. 18), licząc, że amunicja ta masową detonacją nie zagraża.

Amunicja wybuchowa 75 mm (granaty), według danych amerykańskich, zagraża detonacją tylko poszczególnych skrzynek w miarę dochodzenia do nich płomienia [40]).

Próby z 3" (76 mm) nabojami — szrapnelami, przeprowadzone w Rosji na krótko przed wojną światową, wykazały, że pod działaniem ognia ładunek prochowy tej amunicji zapala się i wyrzuca pocisk mniej więcej na 10 kroków. Łuska deformuje się, ale nie rozrywa. Przy dalszem działaniu ognia na wyrzucone z łusek szrapnele, następują eksplozje prochu czarnego w szrapnelach, przyczem lotki szrapnelowe lecą w jedną stronę, a skorupa w przeciwną, czasami na odległość do ½ km. Zdarzają się również wypadki rozerwania skorup. Masowej detonacji amunicja ta nie daje [41]).

Następną i ostatnią grupę materjałów niebezpiecznych w tabeli stanowią spłonki detonujące. Normy załadowania niemi magazynów przy danych strefach bezpieczeństwa przyjmuję, jak w tabeli Dep. Uzbr. Amer. Armji, podając jako maksymalne załadowanie 10.000.000 sztuk.

Poza tabelę wydzielam amunicję małokalibrową zwykłą (nie specjalną), zapalniki do granatów ręcznych, zapalniki do amunicji artyleryjskiej bez wkrętek detonujących, lonty prochowe i t. p. wszystko w przepisowem opakowaniu, zabezpieczającem od masowej detonacji.

Amunicja ta zagraża tylko pożarem i małemi miejscowemi eksplozjami. Przy mniejszych ilościach, powiedzmy do 10.000 kg wagi

---

[40]) p. Przegl. Artyl. Nr. 2—3 1926 r.

[41]) p. Wojna i Tiechnika 1928 r., Nr. 1, s. 47.

brutto, wystarcza tu strefa bezpieczeństwa 50 metrów, jak to przyjęto w austrjackich przepisach z 1910 r. Przy ilościach większych, szczególnie zapalników do granatów ręcznych i zapalników artyleryjskich, strefa 100 m.

Przy pożarze zwykłej amunicji małokalibrowej w przepisowem opakowaniu (tekturowe paczki, cynkowe pudełka i drewniane skrzynki), jak podaje En. Że. [41]), proch w nabojach eksploduje stopniowo i wyrzuca pociski na odległość do 100 kroków. Szybkość jednak tych pocisków jest mała tak, że pod przykryciem 25 mm desek można podchodzić do stołów amunicji i gasić pożar przy pomocy sikawek. W skrzynkach, stojących w głębi stosów, ładunki prochowe eksplodują, lecz pociski nie przebijają nawet skrzyń.

Zapalniki, zaopatrzone w spłonki detonujące, złożone w dużych ilościach w stosy, mogą dać masową detonację [42]). Detonację tę można wykluczyć przez dobór odpowiedniego opakowania. O ile niema pewności, że dane opakowanie zabezpiecza od masowej detonacji, to zapalniki należy traktować narówni z pociskami artyleryjskiemi.

Zestawienie wszystkich proponowanych odległości, w zależności od rodzaju i ilości materjałów niebezpiecznych w magazynie podane jest w tabeli Nr. 18.

Wspólne magazynowanie materjałów niebezpiecznych. Podział ich na grupy przechowywania.

Umieszczenie pewnych materjałów wybuchowych i amunicji w jednej grupie tabeli odległości nie uprawnia do przechowywania ich w jednym magazynie. W tabeli odległości materjały niebezpieczne podzielono na kilka grup w zależności głównie od niebezpieczeństwa, jakim zagrażają one objektom zewnętrznym. Zaliczenie danych materjałów do jednej grupy tabeli odległości wskazuje tylko, że przy przechowywaniu ich obowiązują jednakowe strefy bezpieczeństwa.

W celu natomiast wyjaśnienia, jakie materjały niebezpieczne w razie potrzeby mogą być przechowywane wspólnie w jednym magazynie lub pomieszczeniu, materjały te dzieli się na t. zw. grupy przechowywania. Przy podziale tym wchodzą w rachubę nie strefy bezpieczeństwa, niezbędne do zachowania przy danych materjałach, a wrażliwość ich na impulsy mechaniczne, skłonność do samorozkładu, zachowanie się w razie pożaru (podatność do masowej detonacji przy pożarze) i szczególnie skłonność do reagowania przy wzajemnem zet-

---

[42]) p. Przegl. Artyl. Nr. 2—3 1926 r., s. 140 i Wojna i Tiechnika. 1928 r. Nr. 1, s. 47.

knięciu i do wytwarzania przytem nowych niestałych związków chemicznych, mogących samoczynnie spowodować pożar lub eksplozję.

Niedopuszczalne więc jest wspólne przechowywanie w jednem pomieszczeniu materjałów wybuchowych chloranowych z materjałami zawierającemi saletrę amonową, gdyż przy zmieszaniu ich powstaje chloran amonowy, związek niestały, ulegający samoczynnemu rozkładowi.

Niewskazane jest przechowywanie prochów dymnych, bardzo wrażliwych na impulsy mechaniczne i skłonnych do masowej eksplozji już od iskry, jak również spłonek, zapalników i t. p. wyrobów z amunicją i materjałami wybuchowemi mniej wrażliwemi, gdyż podnosiłoby to bez potrzeby niebezpieczeństwo magazynowania.

Niepożądane jest przechowywanie prochów bezdymnych działowych i małokalibrowych z prochami dymnemi, materjałami wybuchowemi kruszącemi i prochami bezdymnemi porowatemi, gdyż pożar, wywołany przez ewentualny samoczynny rozkład prochu bezdymnego lub w jakikolwiek bądź inny sposób, łatwo mógłby się przez to przeistoczyć w eksplozję. I t. d.

Rozstrzygnięcie, czy dane materjały niebiezpieczne mogą być bez szkody dla sprawy przechowywane wspólnie, wymaga dokładnej znajomości natury i właściwości tych materjałów. Aby ułatwić decyzję w tych sprawach personelowi składnic, w każdym kraju wydane są mniej lub więcej szczegółowe instrukcje, podające, jakie materjały można bez zastrzeżeń przechowywać wspólnie, jakie wolno łączyć w razie nieodzownej potrzeby i jakich bezwzględnie nie wolno jest łączyć.

Polskie przepisy o utrzymaniu amunicji [43]), wzorowane na przepisach francuskich, dzielą materjały wybuchowe i amunicję na 11 grup przechowania. Niektóre grupy podzielone są jeszcze na podgrupy tak, że właściwie otrzymuje się grup 17. Przepisy te podają poza tem, jakich materjałów nie wolno magazynować wspólnie.

Podział na grupy przechowywania w przedwojennej Austrji był nieco odmienny [44]). Grup było 11. Ostatnią grupę stanowiły materjały do doświadczeń, amunicja zdobyczna lub niewiadomego pochodzenia i prochy bezdymne przerobione, które to materjały w przepisach polskich nie są uwzględnione.

Przepisów polskich i przedwojennych austrjackich nie podaję tu więcej szczegółowo, odsyłając interesujących się niemi do podanych

---

[43]) p. Dodatek do Dziennika Rozkazów, Nr. 22/24, art. 33.

[44]) p. książeczkę „O materjałach wybuchowych i amunicji wojennej". Wyd. Zbrojowni Krakowskiej 1919 r., s. 38.

Tabela

Proponowane odległości przy

Załadowanie magazynów					
Spłonki detonujące	Am. artyl. w opak. kal. niżej 100 mm; szrapnele; am. kb. spec. lonty deton.;	Pociski art. bez opak.; am. art. w opak. kal. 100 mm i wyżej	Bomby lotn.; am. okopowa gr ręczn. obr.; gr. kb.; wkrętki det.	Prochy bezd. działowe; ładunki proch. work. i łusk.; wyr. pirotechniczne	Mat. wyb. krusz.; prochy dymne; prochy bezd.; drobn. i porow.; am. wyb. sap.; gr. ręczn. zacz.
sztuk	w kilogramach				
1	2	3	4	5	6
50.000	—	—	—	100	50
100.000	100	50	30	200	100
250.000	500	300	50	500	250
500.000	10.000	750	200	1.000	500
1.000.000	50.000	1.500	400	2.000	1.000
2.500.000	300.000	3.500	1.250	5.000	2.500
5.000.000	—	7.500	4.000	10.000	5.000
10.000.000	—	15.000	10.000	20.000	10.000
—	—	45 000	30.000	40.000	20.000
—	—	120.000	80.000	80.000	40.000
—	—	150.000	120.000	120.000	60.000
—	—	225.000	180.000	180.000	90.000

Amunicja małokalibrowa zwykła, zapalniki do granatów ręcznych, zapalniki do amunicji artyleryjskiej bez wkrętek detonujących, lonty prochowe i t. p., wszystko w przepisowem opakowaniu, w ilościach do 10.000 kg wymaga strefy bezpieczeństwa 50 m (do domów mieszkalnych). Przy ilościach większych, szczególnie zapalników, wskazana jest strefa 100 m.

Magazyny winny być konstrukcji takiej, aby w razie eksplozji części konstrukcyjne w postaci większych odłamków lub palących się głowni nie były rozrzucane na duże odległości.

Podane w tabeli odległości mogą być zredukowane na połowę, o ile magazyny zasłonięte są przez naturalne lub sztuczne przeszkody, jak wzgórza, gęste lasy, wały lub t. p. Przeszkody takie winny odpowiadać następującym warunkom: każda prosta linja, przeprowadzona od szczytu każdej ściany magazynu do jakiegokolwiek bądź punktu sąsiedniego budynku, który ma być zabezpieczony, winna przechodzić przez taką naturalną lub sztuczną przeszkodę; każda prosta linja,

Nr. 18.

magazynach nieobwałowanych.

Minimalne odległości od magazynów do:									
domów mieszk. pojedyńczych	torów kolejowych; dróg ląd. uczęszczanych; dróg wodnych o ruchu osobowym	dróg mało uczęszczanych; budynków pojed. niemieszk.	Osiedli z ludn. ponad 500 osób	Szpitali, szkół, kościołów, teatrów, radjostacyj nadawczych i t. p.	Cennych zabytków architektury, siedzib Najw. Władz Państw.	Sąsiednich magazynów	Wartowni	Budynków administr. składnicy	Domów mieszk. personelu admin.
w metrach									
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
80	50	25	160	500	1.000	—	50	50	80
120	75	40	240	750	1.500	—	50	50	100
200	120	60	400	750	1.500	—	50	50	100
300	180	90	600	1.000	2 000	—	60	60	120
380	230	115	750	1.200	2.500	—	60	80	120
460	280	140	900	1.500	3.000	40	70	90	150
550	330	165	1.100	1.800	3.500	50	80	100	200
620	380	190	1.250	2.000	4.000	60	90	120	240
800	480	240	1.600	2.500	5.000	70	105	140	300
1.050	640	320	2.100	3.000	6.000	80	120	160	500
1.150	700	350	2.300	3.500	7.000	90	135	180	600
1.250	800	400	2.500	4.000	8.000	100	150	200	800

przeprowadzona od szczytu każdej ściany magazynu do jakiegokolwiek bądź punktu znajdującego się na wysokości 4 metrów ponad środkiem toru kolejowego lub drogi, podlegającej zabezpieczeniu, winna przechodzić przez przeszkodę. Stałe przeszkody (wały) powinny być z ziemi lub piasku o szczycie szerokości co najmniej 1 metr i o stosunku szerokości podstawy zbocza do wysokości jak 1 do 1, o ile zbocza wyłożone są darniną, względnie 1,5 do 1, o ile zbocza nie są wyłożone darniną, a tylko obsiane trawą. Czasowe przeszkody mogą być budowane z jakiegokolwiek kruchego materjału; winny one być wypełnione ziemią i posiadać szczyt o szerokości co najmniej 1 metr.

Załadowywanie magazynów ilościami materjałów niebezpiecznych, przekraczającemi równowartość 60.000 kg materjałów wybuchowych kruszących, podaną w przedostatnim wierszu tabeli, wskazane jest tylko w wyjątkowych wypadkach.

Odległości liczy się od ścian zewnętrznych magazynu do najbliższych ścian zewnętrznych sąsiednich budynków.

źródeł. Nie podaję również zbliżonych do austrjackich przepisów niemieckich. Obszernie natomiast przytaczam niżej mało znane u nas odnośne przepisy angielskie, dość znacznie różniące się od naszych, i bardzo pomysłową tabelę, zaczerpniętą z pracy prof. Sapożnikowa.

Przepisy angielskie, jak podaje Weaver [45]), dla celów magazynowania grupują materjały wybuchowe i amunicję w następujący sposób:

Grupa I. Materjały, które należy przechowywać w specjalnych magazynach (amunicyjnych).

Materjały każdej podgrupy grupy I wymagają oddzielnego pomieszczenia, z wyjątkiem materjałów podgrupy *a* i podgrupy *e*, które mogą być magazynowane wspólnie.

W magazynach z materjałami podgrupy *a* i *b* obowiązuje zachowanie „warunków magazynowych" (specjalnych przepisów ostrożności).

Materjały grupy I dzielą się na podgrupy:

a) Prochy bezdymne jak również prochy czarne i brunatne w stanie luźnym lub w ładunkach do dział wielkich kalibrów. Lonty szybkopalne.

b) Nitroceluloza sucha. Dynamity. Żelatyna wybuchowa.

c) Nitroceluloza wilgotna. Kwas pikrynowy i jego wybuchowe pochodne.

d) Szybkostrzelna amunicja do dział kalibru 3 cale i niżej.

e) Szybkostrzelna amunicja do dział kalibru powyżej 3 cali, o ile proch jest w łuskach lub w blaszankach, umieszczonych w skrzyniach drewnianych.

Grupa II. Materjały, które należy przechowywać w oddzielnych pomieszczeniach magazynu amunicyjnego lub w oddzielnych budynkach.

Na grupę tę składają się podgrupy:

a) Kapiszony. Amunicja małokalibrowa. Masy (mieszaniny) zapłonnikowe i pirotechniczne; luźne mieszaniny, zawierające piorunian lub chlorany. Próżne łuski z zapłonnikami. Zapalniki czasowe, uderzeniowe i podwójnego działania. Lonty powolne. Rakiety. Zapłonniki wszelkich rodzajów (tarciowe, uderzeniowe i elektryczne).

b) Nabite miny.

---

[45]) p. Notes on Military Explosives by E. M. Weaver, mjr.-gen. U. S. Army. New-Jork 1917, s. 214.

c) Nabite pociski z zapalnikami lub bez.
d) Spłonki detonujące.

Prochy, bawełna strzelnicza sucha, dynamity i żelatyna wybuchowa muszą być przechowywane zawsze w specjalnych magazynach z zachowaniem przepisowych środków ostrożności.

Materjały grupy II nie wymagają specjalnych magazynów, można je przechowywać w odosobnionych pomieszczeniach lub magazynach zwykłych, bez przestrzegania specjalnych warunków przechowywania.

Materjały podgrup *c*, *d* i *e* grupy I w razie potrzeby można przechowywać w magazynach zwykłych, jak materjały grupy II.

Materjałów jakichkolwiek bądź dwóch podgrup obu powyższych grup nie wolno przechowywać wspólnie w jednem pomieszczeniu lub stosie. Wyjątek stanowią materjały podgrup *a* i *e* grupy I, które wolno magazynować wspólnie, oraz zapalniki i zapłonniki grupy II, które w osobnej skrzyni i zdala od pocisków można przechowywać w przedziale magazynu, przeznaczonem na pociski.

Magazyn może być podzielony na kilka pomieszczeń, przeznaczonych na materjały różnych podgrup jednej grupy. Ściany, oddzielające sąsiednie pomieszczenia, winny być solidne i bez żadnych otworów (drzwi, okien i t. p.), łączących te pomieszczenia.

Materjały jednej podgrupy wolno przechowywać wspólnie w jednym magazynie lub pomieszczeniu.

Przyjęty w Anglji podział materjałów niebezpiecznych na grupy przechowywania odbiega, jak widzimy, znacznie od podziału, przyjętego u nas. Szczególne zastrzeżenia może budzić podgrupa *a* grupy II, gdzie dość bezładnie zgromadzono najrozmaitsze materjały, niedopuszczalne do wspólnego przechowywania według przepisów innych krajów, jak również podgrupa *a* grupy I, zalecająca wspólne magazynowanie prochów bezdymnych z prochami dymnemi.

Zkolei przechodzę do podanej przez prof. Sapożnikowa tabeli, wykazującej, jakie materjały niebezpieczne wolno jest łączyć razem przy magazynowaniu i transportach [46]) Tabela ta, ułożona w pomysłowy sposób (p. tabela Nr. 19), nie wymaga żadnych dodatkowych wyjaśnień. Jest ona szczegółowa i przejrzysta i zasługuje na przestudjowanie, choć wzbudza zastrzeżenia, co do pewnych punktów i zawiera niestety wiele błędów, trzeba przypuszczać drukarskich, rzucających się w oczy już przez samą niesymetryczność rysunku krzyżyków.

---

[46]) p. prof. A. W. Sapożnikow. Zawody dla proizwodstwa porochow i wzrywczatych wieszczestw. Moskwa 1929 r., s. 50.

TABELA

Klasyfikacja materjałów niebezpiecznych dla

Klasyfikacja podług rodzaju i stopnia niebezpieczeństwa	Grupa Nr.:	Grupy materjałów niebezpiecznych i warunki wspólnego przechowywania ich: a) Materjały klasy I (mat. wybuchowe) przechowuje się zawsze w osobnych magazynach. b) Znak X, postawiony w poszczególnych kratkach, wskazuje, że materjałów niebezpiecznych, podanych w poziomym i pionowym wierszach, schodzących się w danej kratce, nie wolno wspólnie przechowywać i wspólnie przewozić na statkach. c) Grupy podane są według stopnia niebezpieczeństwa ich przechowywania, poczynając od najwięcej niebezpiecznych w każdej poszczególnej klasie.
Klasa I **Materjały wybuchowe.** Zagrażają wielkiemi eksplozjami, niebezpiecznemi dla całej składnicy.	1.	Dynamit, żelatyna wybuchowa i inne mat. wyb. nitroglicerynowe . . . . . .
	2.	Prochy dymne . . . .
	3.	Prochy bezdymne w skrzynkach lub ładunkach .
	4.	Tetryl, melinit, trotyl, amatol, amonal, sznajderyt i t.p.
	5.	Nitroceluloza wilgotna . . . . . .
	6.	Piorunian rtęci wilgotny . . . . . .
Klasa II **Amunicja i elementy jej.** Zagrażają miejscowemi eksplozjami, mniej groźnemi dla składnicy.	1.	Wyroby pirotechniczne, rakiety, am. sygnałowa it.p.
	2.	Amunicja zapalająca (nie fosforowa) . . .
	3.	Pociski wybuchowe (granaty). . . . .
	4.	Szrapnele i granaty małych kalibr. z prochem dymn.
	5.	Amunicja działowa zespolona . . . .
	6.	Amunicja małokalibrowa. . . . . .
	7.	Zapalniki czasowe i zapłonniki . . . .
	8.	Lonty prochowe i detonujące . . . .
Klasa III **Urządzenia detonujące.** Niebezpieczne w łączności z amunicją i materjałami wybuchowemi.	1.	Spłonki detonujące . . . .
	2.	Zapalniki detonujące, detonatory . . . .
	3.	Granaty ręczne z zapalnikami . . . .
Klasa IV **Niebezpieczne materjały niewybuchowe.** Zagrażają pożarem, zatruciami i szkodliwem działaniem na inne materjały.	1.	Palne ciecze: benzol, toluol, benzyna, spirytus i t. p.
	2.	Palne ciała stałe: fosfor, celuloid i t. p. . .
	3.	Gazy skroplone i palne (acetylen) . . .
	4.	Skroplone gazy trujące i pociski gazowe duszące .
	5.	Skroplone gazy niepalne i nietrujące (dwutl. węgla)
	6.	Saletry, chlorany i nadchlorany . . . .
	7.	Karbid, krzemek wapnia, żelazo-krzem . .
	8.	Mocne kwasy: siarkowy, azotowy i solny . .

celów magazynowania i transportów w Z. S. S. R.

1. Dynamit, żelatyna wyb. i inne mat. wyb. nitroglicerynowe	2. Prochy dymne	3. Prochy bezdymne	4. Tetryl, melinit, trotyl, sznajderyt i t. p.	5. Nitroceluloza wilgotna	6. Piorunian rtęci wilgotny	1. Wyr. pirotechn.; rakiety, am. sygnałowa i t. p.	2. Am. zapalająca (nie fosforowa)	3. Pociski wybuchowe (granaty)	4. Szrapnele i granaty z prochem dymnym	5. Amunicja działowa zespolona	6. Amunicja małokalibrowa	7. Zapalniki czasowe i zapłonniki	8. Lonty prochowe i detonujące	1. Spłonki detonujące	2. Zapalniki detonujące, detonatory	3. Granaty ręczne z zapalnikami	1. Palne ciecze: benzol, toluol, benzyna i t. p.	2. Palne ciała stałe: fosfor, celuloid	3. Gazy skroplone i palne (acetylen)	4. Skropl. gazy trujące i pociski gaz. duszące	5. Skroplone gazy niepalne i nietrujące	6. Saletry, chlorany i nadchlorany	7. Karbid, krzemek wapnia, żelazo-krzem	8. Mocne kwasy: siarkowy, azotowy i solny
	X	X	X	X	X	X	X							X	X	X	X	X	X	X		X		X
X		X			X	X	X							X	X	X	X	X	X	X		X		X
X	X				X	X								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X					X	X								X	X	X	X	X	X	X		X		X
X					X	X								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X					X	X																		X
X					X	X								X	X	X								X
X					X	X											X	X	X					X
X					X	X																		X
X					X	X																		X
X					X	X																		X
					X																			X
X	X	X	X	X	X	X		X																X
X	X	X	X	X	X	X		X																X
X	X	X	X	X	X	X		X																X
X	X	X	X	X	X	X																X		X
X	X	X	X	X	X	X																X		X
X	X	X	X	X	X	X																X		X
X	X	X	X	X	X	X																		X
	X	X		X	X																			X
X	X	X	X	X	X	X											X	X						X
X	X	X		X	X	X																		X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Nie wdając się w szczegółowe opinjowanie przytoczonych przepisów, poniżej pozwalam sobie podać projekt nowego podziału materjałów niebezpiecznych na grupy przechowania, oparty, w miarę możności, na najnowszych poglądach.

W projekcie tym staram się wyjaśnić również warunki przechowywania materjałów niebezpiecznych w małych składnicach.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa wewnętrznego wskazane jest przechowywanie poszczególnych rodzajów amunicji i materjałów wybuchowych w oddzielnych magazynach z wyzyskaniem ich pojemności. Wykonalne jest to jednak tylko przy magazynowaniu materjałów w bardzo dużych ilościach. Normalnie zaś ograniczona ilość magazynów, względnie wielka pojemność poszczególnych magazynów zmusza do przechowywania paru lub kilku rodzajów materjałów niebezpiecznych w jednym magazynie. A im mniejsza jest składnica, tem więcej zwykle, ze względu na koszty terenu, budowy i eksploatacji składnicy, narzuca się konieczność łączenia rozmaitych rodzajów amunicji lub materjałów wybuchowych w jednym magazynie za cenę nawet obniżenia bezpieczeństwa i ewentualnie większych strat w razie eksplozji.

W uwzględnieniu powyższego podaję najpierw pożądane, zdaniem mojem, rozbicie materjałów niebezpiecznych na grupy przechowywania w składnicach dużych, a następnie łączenie tych grup, dopuszczalne w składnicach mniejszych.

W składnicach dużych, o ile warunki nie pozwalają na przechowywanie każdego rodzaju amunicji i materjałów wybuchowych w magazynach osobnych, za dopuszczalne uważam wspólne przechowywanie materjałów w następujących grupach:

Grupa I. Prochy dymne (czarne i brunatne), jak również saletra wybuchowa w opakowaniu. Wyroby, zawierające z materjałów wybuchowych wyłącznie proch dymny (ładunki prochu czarnego workowe, petardy prochowe, huki, miny ziemne i t. p.).

Grupa II. Prochy bezdymne nitrocelulozowe i nitroglicerynowe do amunicji działowej i małokalibrowej nieporowate-luźne w opakowaniu. Ładunki prochowe workowe. (W miarę możności prochy nitrocelulozowe pożądane jest przechowywać osobno od prochów nitroglicerynowych).

Grupa III. Tetryl, heksyl, czteronitropentaerytryt, mielone prochy bezdymne nitrocelulozowe i nitroglicerynowe, prochy bezdymne porowate (ćwiczebne i myśliwskie) — w stanie suchym, luźne w opakowaniu. Dynamity. Nitroceluloza sucha. (W miarę możności prochy.

nitrocelulozę i dynamity pożądane jest przechowywać osobno od tetrylu, heksylu i czteronitropentaerytrytu).

Grupa IV. Trotyl, kwas pikrynowy i inne nitrozwiązki aromatyczne, nie więcej wrażliwe na tarcie i uderzenia niż kwas pikrynowy, — w stanie suchym w opakowaniu. Materjały wybuchowe grupy III w stanie wilgotnym, z zawartością wody ponad 15%. Amunicja wybuchowa saperska trotylowa i melinitowa. Lonty detonujące trotylowe i t. p., z wyjątkiem lontów piorunianowych.

Grupa V. Materjały wybuchowe chloranowe. Mat. wyb. nadchloranowe, nie zawierające saletry amonowej.

Grupa VI. Materjały wybuchowe amonowe. Mat. wyb. nadchloranowe, zawierające saletrę amonową.

Grupa VII. Zapalniki do amunicji działowej z wkrętkami detonującemi. Kapiszony i spłonki detonujące. Lonty prochowe. Lonty detonujące piorunianowe.

Grupa VIII. Wszelka amunicja świetlna, sygnałowa, zapalająca, smugowa i dymna, z wyjątkiem amunicji fosforowej.

Grupa IX. Wszelka amunicja fosforowa (działowa, małokalibrowa i inna).

Grupa X. Wszelka amunicja małokalibrowa z wyjątkiem wymienianej w grupach VIII, IX i XI. Zapłonniki i zapalniki do amunicji działowej — bez wkrętek detonujących, w przepisowem opakowaniu. Zapalniki do granatów ręcznych. Granaty ręczne ślepe. Rury ołowiane z prochem dymnym ścieżkowym.

Grupa XI. Amunicja wybuchowa działowa (naboje zespolone lub niezespolone), jak również same pociski wybuchowe (granaty) kalibru do 105 mm włącznie, w przepisowem opakowaniu. Szrapnele wszelkich kalibrów, w opakowaniu lub bez opakowania. Amunicja małokalibrowa do wstrzeliwania. Ładunki prochowe łuskowe amunicji artyleryjskiej i okopowej, ostre i ślepe, w opakowaniu.

Grupa XII. Granaty artyleryjskie kalibru do 105 mm włącznie bez opakowania. Granaty wybuchowe artyleryjskie kalibru ponad 105 mm w opakowaniu lub bez opakowania. Bomby wybuchowe okopowe i lotnicze w opakowaniu lub bez opakowania, z zapalnikami lub bez zapalników. Wkrętki detonujące.

Grupa XIII. Granaty ręczne i karabinowe z zapalnikami lub bez zapalników.

Grupa XIV. Amunicja gazowa.

W mniejszych składnicach i przy braku pomieszczeń uważam za dopuszczalne łączenie razem w pierwszym rzędzie:

1. Materjałów grupy II z amunicją małokalibrową grupy X.
2. Materjałów grup III, IV i VI, unikając w miarę możności łączenia kwasu pikrynowego z materjałami wybuchowemi amonowemi.
3. Materjałów grup VII i X lub VII i XI przy stosunkowo małych ilościach materjałów grupy VII i oddzielając je od materjałów grupy X i XI przegrodą ze skrzyń amunicyjnych, wypełnionych piaskiem.
4. Materjałów grupy X i XI przy stosunkowo małych ilościach materjałów grupy X. Zastrzeżenie to nie odnosi się do amunicji małokalibrowej grupy X.
5. Materjałów grup XI i XII.

W składnicach jeszcze mniejszych lub czasowych łączenie materjałów przy przechowywaniu może iść jeszcze dalej z zastrzeżeniem, że materjały wybuchowe chloranowe nie mogą być magazynowane w jednem pomieszczeniu z materjałami wybuchowemi, zawierającemi saletrę amonową, a spłonki, zapalniki i t. p. — z materjałami wybuchowemi luźnemi (materjałami grup I do VI włącznie).

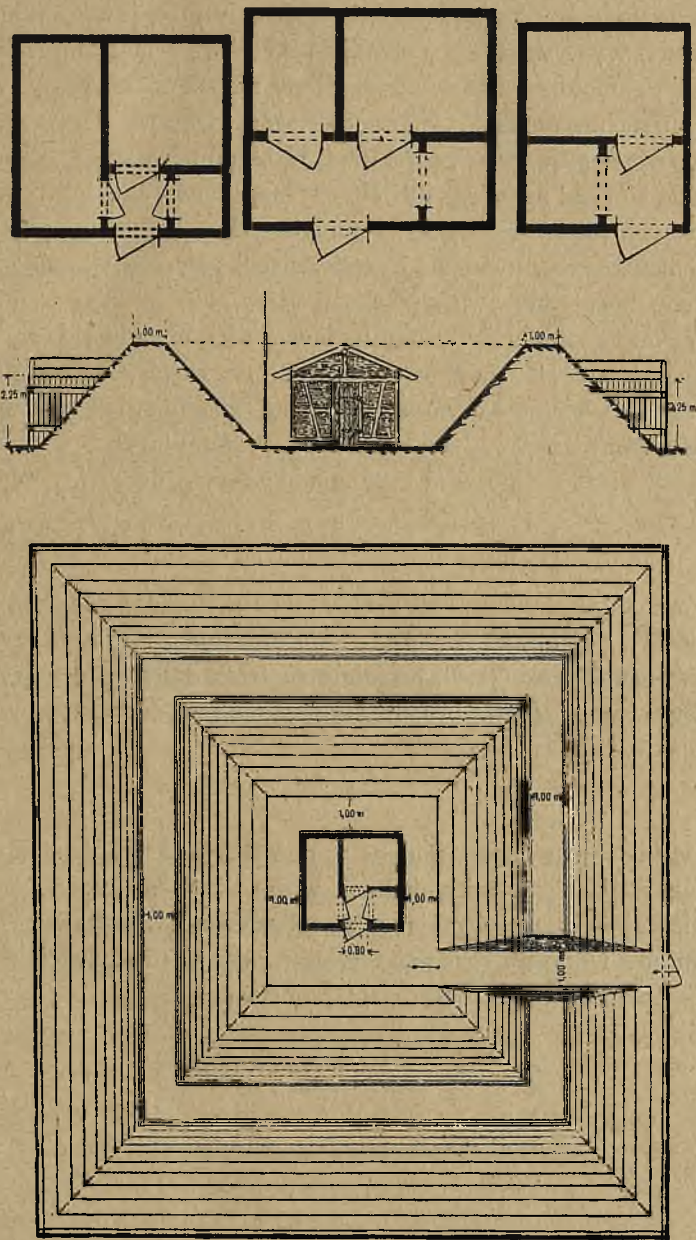
Na rys. 4 podaję dla przykładu plany małych magazynów przemysłowych, zalecane przez władze górnicze w Bawarji [47]). Najmniejsze pomieszczenia każdego z pierwszych dwóch magazynów przeznaczone jest na spłonki, lonty i t. p., dwa pozostałe pomieszczenia na materjały wybuchowe: w jednem — mat. wyb. niebezpieczne (dynamity, mat. wyb. chloranowe i t. p.), w drugiem — mat. wyb. bezpieczne (trotyl, mat. wyb. amonowe i t. p.) i proch czarny. W magazynie trzecim — małe pomieszczenie przeznaczono na spłonki, duże — na mat. wyb. niebezpieczne lub proch czarny i mat. wyb. bezpieczne.

Racjonalne rozmieszczenie materjałów niebezpiecznych w stojących do dyspozycji magazynach wymaga orjentowania się odnośnego personelu we właściwościach magazynowanych materjałów. Personel ten w poszczególnych wypadkach, w ramach wydanych przez władze wyższe ogólnych instrukcyj w tej sprawie, musi wykazać niejednokrotnie własną inicjatywę, gdyż niemożliwością jest przewidzieć i omówić w instrukcjach wszelkie możliwe kombinacje, jakie mogą się zdarzyć w praktyce składnic amunicyjnych.

Aby projekty nowopowstających składnic były życiowe i posiadały rzeczywistą wartość, organa, projektujące te składnice, również winny obznajmić się z odnośnemi instrukcjami fachowemi i do pewnego stopnia orjentować się we właściwościach materjałów, które ma-

---

[47]) p. Sprengmittel und Sprengarbeiten von W. Weiss-Hebenstreit. München. 1920, s. 74.



Rys. 4.

ją być przechowywane w projektowanych składnicach. W przeciwnym razie dają się niejednokrotnie obserwować objawy nadmiernej ostrożności, wypływające z nieznajomości natury materjałów wybuchowych i amunicji i z przesadnej oceny niebezpieczeństwa, związanego z przechowywaniem tych materjałów. Objawy te szczególnie jaskrawo występują przy projektowaniu składnic małych, gdzie wysuwane są wnioski budowy oddzielnych magazynów często dla bardzo nieznacznych ilości rozmaitej amunicji. Uwzględnienie tych wniosków, nieusprawiedliwionych rzeczywistą potrzebą, zwiększyłoby wprawdzie bezpieczeństwo przechowywania, ale zwiększyłoby również, i to niewspółmiernie koszty budowy i eksploatacji składnic.

Artykuł niniejszy podaję do ogólnej wiadomości w nadziei, że treść jego przyczyni się do rozszerzenia wiadomości, niezbędnych przy zakładaniu i prowadzeniu składnic amunicyjnych i w pewnych wypadkach ułatwi odnośnym organom powzięcie decyzji.

Na zakończenie pozwalam sobie złożyć tu szczere podziękowania pp. ppłk. W. Kamińskiemu i kpt. J. Hołowaczowi, którzy w związku z pewną komisją dostarczyli mi wiele cennych danych do powyższego artykułu i szczegółowo przedyskutowali ze mną poruszone w artykule kwestje.

Strefy bezpieczeństwa, podane w powyższym artykule, jako proponowane, z nieznacznemi zmianami, wprowadzonemi przez komisje, w najbliższej przyszłości mają wyjść w Przepisach Służbowych, jako obowiązujące. Odnośny rozdział artykułu może więc służyć jako wyjaśnienie do nowej tabeli stref bezpieczeństwa.

535.337

Dr. TUCHOLSKI TADEUSZ.

O ZASTOSOWANIU ANALIZY WIDMOWEJ DO BADAŃ TEMPERATURY WYBUCHU ZWIĄZKÓW I MIESZANIN WYBUCHOWYCH.

1. Jedną z najtrudniejszych do oznaczenia wielkości w balistyce i technice materjałów wybuchowych jest temperatura, wytwarzana przez wybuch, pokrótce — temperatura wybuchu. Z powodu gwałtowności eksplozyj i detonacyj niesposób wyznaczyć jej bezpośrednio termometrami, pirometrami i t. p. przyrządami, używanemi do oznaczeń temperatury, lecz wylicza się ją pośrednio z wyników badań nad t. zw. średniem ciepłem właściwem produktów powybuchowych [1]) lub też ze zmierzonego w chwili wybuchu ciśnienia maksymalnego [2]). Wyniki, otrzymane z pomocą obu metod, względnie ich modyfikacyj, bardzo różnią się od siebie; różnica ta szczególniej jaskrawo występuje w materjałach wybuchowych kruszących i, jak widać w tab. 1-ej, jest tem większa, im większą jest temperatura wybuchu.

Niektórzy autorzy przypisują wybuchom wyższe temperatury od podanych w tab. 1. Podług H. v. Wartenberga [3]) mają się one wahać między 4000° C a 5000° C; Rudenberg [4]), przypuszcza istnienie na pograniczu fali detonacji warstewki o grubości 0,001 mm, w której

---

[1]) C. Cranz. Ballistik, Berlin, T. 2, s. 57 (1926) M. Windakiewicz, Balistyka wewnętrzna, Warszawa, s. 13, (1929).

[2]) C. Cranz. l. c., s. 62. M. Windakiewicz. l. c. s. 31.

[3]) H. v. Wartenberg. Zs. f. Elektrochemie. T. 30, 1924, s. 354.

[4]) Handb. d. Physik, Berlin, T. 2, s. 370, 1926.

Tablica 1.

Materjał wybuchowy	Temperatura wybuchu	Uwagi.
Bawełna kolodjonowa	1940° C [5, 6, 7]	
Proch bezdymny	2870° C [8] 2752° C [8]	z śr. ciep. wł. z ciśń. maks.
Kwas pikrynowy	2430° C [5, 6] 2600° C [7] 2800° C [9] 3230° C [8]	
Żelatyna wybuchowa o 12% nitrogliceryny	3213—16° C [10, 11] 3540° C [6, 6, 7] 4300° C [8, 9] 4469° C [10]	

panuje temperatura rzędu 10.000° C. Becker [12]) twierdzi, że temperatura wybuchu jest wielkością rzędu 30.000° C, a W. C. Holmes [13]) opierając się na adjabetycznem gwałtownem spalaniu wybuchowem, przypuszcza powstawanie temperatury 40.000° C.

2. Wiązka światła, puszczona na pryzmat szklany, załamuje się i rozszczepia, wytwarzając t. zw. widmo, t. j. zespół barw od czerwonej do fiołkowej, układy barwnych linij lub też t. zw. pasm. Niekiedy występują kombinacje linij z pasmami. Linje odpowiadają atomom pierwiastków (np. H, Na, K.Ca, i t. d.), pasma — cząsteczkom (NO, CO.CaO, FeO, i t. d.), bądź też grupom (OH, CN; NH, i t. p.) chemicznym. Sole metali ($CaCl_2$, NaCl, C_6H_2 $(NO_2)_3$ OMe i inne), pobudzone do świecenia dają widma swego katjonu (np. linje Ca, Na),

[5]) R. Eskales. Nitrosprengstoffe. Leipzig, (1915), s. 407.
[6]) H. Brunswig. Explozivstoffe. Leipzig. (1923). s. 94.
[7]) A. Stettbacher. Schiess-und Sprengstoffe, Berlin, (1919), s. 63.
[8]) H. Kast, Spreng-und Zündstoffe, Braunschweig, (1921), s. 65.
[9]) C. Cranz. l. c., s. 107.
[10]) Mallard i Le Chatelier oraz Burlot i Muraour, pdł. A. Stettbachera. Zs. ges. Schiess-und Sprengstoffwesen. T. 24, s. 86. (1929).
[11]) Micewicz. Chemja materj. wybuch., Warszawa (1926), s. 26.
[12]) Handb. d. Physik, Berlin, T. 2, s. 370, 1926.
[13]) podł. A. Stettbachera. Zs. ges. Schiess-und Sprengstoffwesen. T. 24, 1929, s. 86.

niekiedy jego tlenku (np. pasma CaO, Feo), a w pewnych wypadkach chlorków, wodorków lub azotków metali (pasma $CaCl_2$, FeN, HgH). Zależnie od sposobu pobudzenia pierwiastka metalicznego do świecenia, otrzymuje się różne rodzaje widm, a mianowicie: płomienne, łukowe i iskrowe [14]).

Widma płomienne powstają, jeżeli wprowadza się sól badanego metalu do płomieni. Nie obfitują one w linje, zawierają często pasma, odpowiadające tlenkom, niekiedy chlorkom metali. Linje należą do t. zw. atomu pobudzonego, choć czasem, np. u wapnia, pojawiają się linje, należące do atomu zjonizowanego. W miarę wzrostu temperatury ilość linij staje się coraz obfitszą, zmienia się ich intensywność, a widmo posuwa się coraz dalej w stronę ultrafioletu.

Widma łukowe powstają w łuku elektrycznym, palącym się między elektrodami z badanego pierwiastka, a także, gdy sól pierwiastka metalicznego wprowadzać między elektrody węglowe. Większość linij tego widma należy do atomu pobudzonego, lecz występują także w niewielkiej liczbie linje iskrowe. Niekiedy pojawiają się pasma wodorków i azotków. Widmo łukowe sięga w ultrafiolet do ca 270 μμ.

Widma iskrowe mają zasięg jeszcze większy, bo aż do 100 AU. Linje widma iskrowego należą przeważnie do atomów zjonizowanych, rzadziej pobudzonych. Naturalnie, każdy z rodzajów widm posiada różnice w intensywności linij; także, obok widma pierwiastka badanego, występują pasma produktów reakcyj spalania gazów, linje użytych elektrod (C) i t. d.

A. King [15]) w szeregu prac swych nad t. zw. widmami piecowemi [16]) wykazał istnienie ścisłego związku pomiędzy budową widma a temperaturą pieca elektrycznego, pobudzającego pierwiastki do świecenia. Sądzę, że zależność tę będzie można wykorzystać narazie, jeżeli nie do zupełnie ścisłego oznaczania temperatur wybuchów, to przynajmniej do ustalenia ich górnej granicy.

3. Badania nad widmami wybuchowemi metali, powstającemi podczas wybuchu związków i mieszanin wybuchowych, zapoczątkowano niedawno. Pierwszy Laffitte [17]) zapomocą prymitywnego spektografu, zestawionego ze zwykłego aparatu fotograficznego, przed którego objektywem ustawił pryzmat szklany, sfotografował widmo

---

[14]) Handb. d. Physik, Berlin, T. 19, s. 264, (1926).

[15]) A. King. Astrophys. Journal. T. 28. s. 300, s. 389 (1909). T. 37, s. 119, (1913), T. 48, s. 13, (1918). T. 51, s. 179, (1920).

[16]) Widmo z przestrzeni pieca elektrycznego, w którym można regulować temperaturę.

[17]) Laffitte, Ann. Chim. phys. T. 4. p. 587, (1927).

wybuchu dynamitu. Szparą tego spektografu był właśnie cienki nabój dynamitu, ustawiony w odległości ca 7-iu metrów od aparatu. Przekonał się on, że detonacja dała dwa rodzaje widma, odpowiadające dwu jej fazom: w pierwszej — fali detonacji — powstawało widmo ciągłe; w drugiej — fali uderzeniowej — płomienne widmo linjowe pierwiastków, znajdujących się lub wprowadzonych do dynamitu w postaci wolnej lub związanej. Stale pojawiała się linja sodu 5896-90 AU [18]) i grupy linij wapnia, po wprowadzeniu spirali miedzianej lub taśmy magnezowej występowały linje charakterystyczne tych pierwiastków. Badania drugiego autora — Petrikalna [19]) nad rozkładem wybuchowym kilku azotków i piorunianu rtęci wykazały, że rozpad związków wybuchowych, zawierających chemicznie związany pierwiastek metaliczny, daje również widmo płomienne tego pierwiastka.

4. Tematem mojej pracy było dokładne zbadanie charakteru widm, powstających przy rozkładzie wybuchowym pikrynianów, pobudzonych do wybuchu:

1) ogrzewaniem ich do t. zw. temperatury fuknięcia (Verpuffungstemperatur);
2) przez detonowanie ich w mieszaninie z innemi materjałami wybuchowemi [20]);

aby tą drogą między innemi wyznaczyć temperatury wybuchów.

Zdjęcia widma robiłem zapomocą kwarcowego spektografu A. Steinhalla, na kliszach Extra-Rapid Lumiera, uczulonych podług metody Edera i Valenty [21]).

Pikryniany pobudzałem do eksplozji (fuknięcia), podgrzewając je ostrożnie do utraty wody krystalizacyjnej i stopienia, a następnie szybko do wybuchu. Operację tę przeprowadzałem na osłoniętym piecyku (rys. 1a), ustawionym przed szparą spektografu tak, by obraz eksplozji soczewka kwarcowa odrzucała na szparę (rys. 1b). Na otrzymanie jednego spektogramu trzeba było przeprowadzić 100 eksplozyj. W ten sposób zbadałem pikryniany sodu, potasu, wapnia, baru, miedzi, żelaza.

---

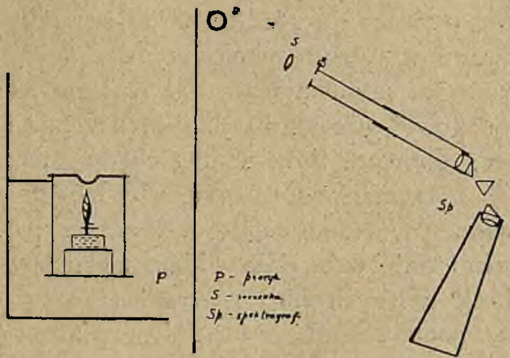
[18]) 1 AU — międzynarodowy angstroem — $^1/_{10}$ millimikrona.

[19]) A. Petrikaln. Zs. Phys. T. 37, s. 670, (1926).

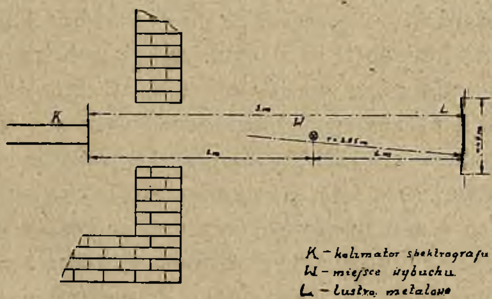
[20]) Badałem mieszanki pikrynianów z materjałami kruszącemi, bo czyste (badałem pikryniany żelaza i wapnia) od kapsli nie detonowały, (mimo przepisywanej im nadzwyczajnej wrażliwości na potarcie, uderzenie i t. p. czynniki powodujące wybuch), natomiast rozlatywały się na wszystkie strony bez wybuchu. Nie pomogło proszkowanie, mniej lub więcej silne ubijanie ładunków, stosowanie rozmaitych detonatorów. Dopiero dodawanie pikrynianów do innych mat. wych. dawało ładunki normalnie detonujące, jeżeli zawierały one nie więcej, jak 43% pikrynianu. Do badań używałem ładunków, zawierających 20% pikrynianu.

[21]) Eder i Valenta. Atlas typischen Spektren, Wien, (1910), s. 2.

Detonacje przeprowadzałem z 10-gramowemi ładunkami mieszanek pikrynianu z bawełną kolodjonową i kwasem pikrynowym oraz 5-gramowemi ładunkami mieszanki pikrynianów z żelatyną wybuchową. Na otrzymanie jednego spektogramu trzeba było przeprowadzić od 50 do 100 detonacyj. Ładunki zawieszałem w ten sposób, by zawsze obraz jednych i tych samych części poszczególnych ładunków rzucany był na szparę spektografu. Jedną z kombinacyj aparatury, służącej do robienia zdjęć wyobraża rys. 2.



Rys. 1.



Rys. 2.

Widma w eksplozji pikrynianów będę nazywać widmami eksplozji, widma z detonacyj — widmami detonacji.

5. W artykule niniejszym nie będę omawiał szczegółowych wyników pracy mojej [22]), bo, narazie, materjał zebrany ma znaczenie raczej teoretyczne. Podaję natomiast uogólnienie wyników w postaci,

---

[22]) Szczegółowy artykuł ukaże się wkrótce w Pracach Polsk. Akad. Um. — tam odsyłam interesujących się szczegółami.

pozwalającej na wyciągnięcie wniosków, dotyczących temperatur wybuchów.

Okazało się, że widma eksplozji pikrynianów są widmami płomiennemi, zbliżonemi do otrzymywanych z płomienia wodorotlenowego, w których jednak występuje szereg swoistych zmian, jak zmiana budowy widma cząsteczkowego, pojawienie się lub zanik niektórych linij.

Widma detonacyj są typowemi widmami płomiennemi. Budowa ich zależy ściśle od temperatury wybuchu. Zależnie od użytego materjału wybuchowego następują różnice w pojawieniu się poszczególnych linij, np. wapń w bawełnie kolodjonowej daje linję 4227 AU; w kwasie pikrynowym pojawiają się dalsze linje 3969 i 3934 AU; w żelatynie wybuchowej wzrasta bardzo intensywność całego widma. pojawia się szereg dalszych linij, widmo ciągłe ,może cząsteczkowe, sięga do 330 μμ. Pikrynian żelaza, dający w bawełnie kolodjonowej i w kwasie pikrynowym widmo ciągłe oraz cząsteczkowe FeO, w żelatynie wybuchowej daje wspaniałe widmo wybuchowe linjowe, któremu chociaż brak pewnych linij powyżej 500 μμ, to jednak od 443 μμ wdół przypomina widmo z gazu piorunującego [23]), lecz o głębszym zasięgu w stronę ultrafioletu, bo do 270 μμ (w gazie piorunującym dochodzi do 340 μμ).

Przyjmując za temperatury wybuchu temperatury podane na tablicy 1-ej, powinniśmy otrzymać, jeżeli nie widma iskrowe 1-go, 2-go i wyższych stopni jonizacji, to przynajmniej potężne widma łukowe. Tymczasem nic podobnego nie dzieje się. Widmo linjowe eksplozji pikrynianów (np. u pikr. wapnia) składem swym nie dorównują nawet widmom z wybuchów mieszaniny 2CO z O_2; widma detonacji w bawełnie kolodjonowej (dla Ca) są podobne do widm z palnika Bunsena (płomień gazu św. z powietrzem), lecz mają uboższe widmo cząsteczkowe. Rozpatrując widmo linjowe wapnia w kwasie pikrynowym widzi się, że jest ono podobne do widma z płomienia gazu św. z tlenem w palniku dmuchawkowym. Widma w żelatynie wybuchowej, jak wyżej zaznaczyłem, zbliżają się do widm z płomienia wodorotlenowego; chociaż widmo żelaza nie zawiera linij iskrowych, występujących w łuku elektrycznym i w płomieniu acetylenowym, to jednak u wapnia wzrasta intensywność linij między 530 μμ a 423 μμ, a zasięg widma linjowego dla żelaza w ultrafiolet jest o wiele głębszym. niż otrzymywany normalnie dla widm płomiennych tego pierwiastka.

---

[23]) S. Kalandyk, L. Kozłowski, T. Tucholski. Sprawozdanie i prace Pol. Tow. Fiz. tom. III. 1928. str. 241.

Przeglądając temperatury poszczególnych płomieni widzi się, że wielkości ich są następujące:

gaz św. z powietrzem (płaszcz płomienia bunsenowskiego 1800—2000° C [24]);
gaz św. z tlenem 2200° C [25]);
tlenek węgla z tlenem 2600° C [24]);
wodór z tlenem 2800° C [24]);
acetylen z tlenem 3800° C [24]);
łuk elektryczny wytwarza temperaturę 3800° C [26]).

Uwzględniając wskazane podobieństwa między widmami wybuchowemi i płomiennemi możnaby przyjąć następujące górne granice dla temperatur wybuchu:

dla bawełny kolodjonowej 1900° C;
„ kwasu pikrynowego 2300° C;
„ żelatyny wybuchowej o 92% nitrogliceryny 3200° C.

Wartości niewielkie. Gdzież szukać źródła różnicy tej pomiędzy wynikami pomiarów termicznych lub ciśnieniowych a wynikami analizy widmowej?

Przy obliczeniu temperatury wybuchu z ciśnienienia maksymalnego lub średniego ciepła właściwego gazów powybuchowych, popełnia się pewien błąd, narazie nieunikniony, z powodu braku metody badawczej, zapoznającej nas z przebiegiem wybuchu z punktu widzenia fizykalnego i chemicznego.

Wybuch w chwili powstania i istnienia napewno daje nie produkty, wydobywane z bomby wybuchowej (CO_2, $CO.H_2O$, $N_2.CH_4$ i $(CN)_2$) oraz wolny C, lecz ciała pośrednie (O_2, H_2), wolne grupy OH.CH.NH.NO.CN), może nawet wolne atomy (H.O.C.N). Istnienie ich, jako indywiduów wysoce endotermicznych, związane jest z pochłanianiem dużych ilości energji: dysocjacja H_2O na H_2 i O_2 pobiera 114 Kal. a na H_2 i OH — 121 Kal. [27]).

$$2H_2O = 2H_2 + O_2 \quad - 114 \text{ Kal.}$$
$$3H_2O = H_2 + 2(OH) \quad - 121 \text{ Kal.}$$

Podobnie może zajść dysocjacja CO_2 na CO i O lub C i O_2 i t. p. reakcje dysocjacyjne, endotermiczne.

---

[24]) Handbuch d. Phys. T. 18, Berlin (1926), s. 325 i dalsze.
[25]) W. A. Bone, T. A. Townend. Flame and Comb. in Gases, London, 1927, s. 200.
[26]) Handbuch d. Prys. l. c. T. 9, s. 261.
[27]) K. F. Bonhoeffer, K. Reichardt. Zs. Elektrochemie, T. 34, s. 653 (1928).

Dalej ciepło właściwe gazów rośnie w miarę podnoszenia się nietylko temperatury [28]) ale i ciśnienia. Holborn i Jakob [29]) znaleźli, że dla powietrza rośnie ono w temp. 59° C, przy zwiększaniu ciśnienia do 300 kg/cm², zgodnie z wzorem:

$$10^4 c_p = 2414 + 2{,}86\ p + 0{,}0005\ p^2 + 0{,}0000106\ p^3.$$

O. Knoblauch i W. Koch [30]) ostatnio wykazali, że Cp dla pary wodnej, znajdującej się pod ciśnieniem 120 atmosfer w temperaturze 327° C, wzrasta do 1,967. Wiemy w przybliżeniu, jak wysokie są temperatury i ciśnienia wybuchów, możemy więc sądzić, ilokrotnie w tych warunkach wzrośnie ciepło właściwe gazów powybuchowych, powodując tem samem obniżenie wyliczanej temperatury wybuchu. W tych dwóch czynnikach: 1) wzrastającem w wyższych temperaturach cieple właściwem gazów i 2) w reakcjach pośrednich ciał endotermicznych, których równowaga, w miarę obniżania się temperatury już po wybuchu przesuwa się z prawa na lewo (patrz wzory reakcyj), należy szukać źródła dużych ilości ciepła, mierzonych w wybuchach.

Analiza widmowa w postaci obecnie zastosowanej przeze mnie ujmuje sumaryczny efekt wszystkich faz detonacji, mimo to bezsprzecznie nadaje się do oznaczenia górnej granicy dla temperatury wybuchu. Sądzę jednak, że po wprowadzeniu kilku ulepszeń, będzie jedną z nielicznych metod, które pozwolą nam wyznaczyć rzeczywiste temperatury, wytwarzane przez wybuch. I jedynie ona, w kombinacji z fotografją ruchomą, wykaże szczegółowy przebieg reakcyj chemicznych i zmian fizycznych, zachodzących w chwili istnienia wybuchu, umożliwiając tem samem dokładne zapoznanie się ze zjawiskami wybuchowemi.

Słuszność powyższego wykażą dalsze projektowane badania.

---

[28]) Tę zmianę uwzględniamy w obliczeniach.

[29]) Podł. C. Cranz'a. l. c., s. 59.

[30]) O. Knoblauch, W. Koch, Naturwissenschaften. T. 17, s. 269 (1929).

Inż. TADEUSZ URBAŃSKI.

MATERJAŁY WYBUCHOWE UŻYWANE PRZEZ ARMJĘ NIEMIECKĄ W CZASIE WOJNY 1914 — 1918 r.

(Według *H. Muraour'a* — Mémorial de l'Artillerie Française, II, 503—512, 801—815 — 1922 r.).

Rozwój fabrykacji materjałów wybuchowych w Niemczech w czasie wojny światowej stanowi bardzo ciekawy rozdział w historji przemysłu chemicznego wogóle, a tej jego gałęzi, która nierozerwalnie związana jest z przemysłem wojennym i zagadnieniami mobilizacyjnemi, w szczególności.

Blokada, otaczająca Niemcy w czasie wojny, odbiła się przedewszystkiem na braku surowców, służących do wyrobu materjałów wybuchowych, a więc wszelkich azotanów nieorganicznych (saletry), kwasu azotowego i siarkowego, bawełny, nitrogliceryny, węglowodorów aromatycznych.

Odrazu powstała konieczność zarezerwowania wszystkich związków azotowych tylko do celów wojskowych. Musiano zaniechać stosowania materjałów wybuchowych kruszących, opartych na zasadzie saletry amonowej w kopalniach i zastąpiono je w tym celu materjałami z nadchloranem i chloranem potasu, względnie sodu.

Tak gwałtowna zmiana górniczych materjałów wybuchowych napotkała na duże trudności. Nie było dostatecznej ilości fabryk, produkujących nadchlorany i chlorany, metody fabrykacji nieraz pozostawiały dużo do życzenia, kopalnie znów niechętnie stosowały te ma-

terjały wybuchowe ze względu na niebezpieczeństwo wobec metanu i pyłu węglowego, pomimo udoskonaleń, poczynionych w tym kierunku. Wreszcie zastosowanie nadchloranów do materjałów wybuchowych wojskowych oraz zapotrzebowanie na chlor do fabrykacji gazów bojowych zmusiło do ograniczenia dostawy chloranowych i nadchloranowych materjałów kopalniom.

Taki stan rzeczy groził znów zmniejszeniem wydobycia węgla kamiennego, co musiało pociągnąć za sobą zmniejszenie ilości smoły węglowej, a zatem i węglowodorów aromatycznych — przedewszystkiem zaś toluenu, służącego za produkt wyjściowy do fabrykacji trotylu, który na początku wojny był głównym materjałem wybuchowym, stosowanym przez armję niemiecką.

Aby podołać tym trudnościom, zastosowano szeroko jeszcze jeden materjał wybuchowy górniczy, mający za podstawę *ciekłe powietrze*. To też w połowie 1917 r. piąta część materjałów wybuchowych, używanych przez kopalnie niemieckie przypada na oxyliquit, t. j. materjał kruszący, utworzony przez nasycenie substancji palnej i chłonnej (np. trociny) ciekłem powietrzem.

Taki był w ogólnych zarysach stan produkcji i używanie *materjałów wybuchowych górniczych* w Niemczech w czasie wielkiej wojny.

W dziale *materjałów kruszących* wojskowych zagadnienia racjonalnego dostosowania materjałów wybuchowych do zdolności wytwórczej kraju w czasie wojny było bardziej skomplikowane.

Olbrzymie wysiłki całego przemysłu chemicznego skierowane też były ku temu, aby nie zabrakło surowców; skład chemiczny materjałów kruszących ulegał ciągłym zmianom, dostosuwując się do produktów, jakiemi przemysł w danej chwili rozporządzał, przy jednoczesnem zachowaniu warunku możliwego nieobniżania jakości materjału bojowego. Zmiany poczynione w składzie chemicznym nie stanowiły zazwyczaj udoskonalenia — były tylko nakazem chwili, jednak rzuciły dużo światła na nowe możliwości i rozszerzyły poglądy.

Przed wojną trotyl stanowił główny materjał kruszący, używany przez Niemców do celów wojskowych. Zastosowanie kwasu pikrynowego zostało ograniczone od 1912 r., t. j. od chwili, gdy wyjaśniono, że pociski ładowane nim detonują przedwcześnie od samego tylko uderzenia o zaporę taką jak np. płyty pancerne. Pociski trotylowe podobne uderzenie wytrzymywały.

Na skutek tych doświadczeń kwas pikrynowy pozostawiono tylko w pociskach małego kalibru do dział polowych 7,7 cm. Trotylem zawierającym zwykle nieco wosku (do 5%) napełniano wszelkie pociski większego kalibru. Ładunki były sporządzane oddzielnie w tekturowych osłonkach.

Jeszcze jeden materjał kruszący — bawełnę strzelniczą używaną do torped, już przed wojną zastąpiono bardziej stałą chemicznie i odporną na bodźce mechaniczne mieszaniną topliwą złożoną z

35% trotylu i
65% heksylu.

Dla zmniejszenia jej wrażliwości dodawano 5% wosku.

Z chwilą rozpoczęcia wojny wojsko niemieckie rozporządzało więc trzema wspomnianemi materjałami kruszącemi. W czasie wojny sytuacja uległa zasadniczej zmianie, przyczem zauważamy dwie główne drogi, któremi szła wytwórczość materjałów kruszących i które stanowiły decydujący czynnik wpływający na zaopatrzenie armji niemieckiej.

1) Brak *toluenu* wywołał konieczność zastosowania innych węglowodorów aromatycznych, celem wytworzenia z nich wybuchowych nitrozwiązków. Tak więc *benzen* posłużył do fabrykacji trójnitroanizolu, dwunitrobenzenu, kwasu pikrynowego (przez chlorobenzen). Fenol syntetyczny, który we Francji służył do fabrykacji kwasu pikrynowego — w Niemczech wcale nie był robiony. Próbowano natomiast, ale bez wyniku, fabrykacji syntetycznego toluenu z benzenu. *Naftalen* był używany do fabrykacji dwu- i trójnitronaftalenu.

W 1917 r. Niemcy rozporządzali miesięcznie następującemi ilościami surowców:

3000 tonn benzenu
3000 „ toluenu
200 „ fenolu

} przeznaczone były do wytworzenia 11.500 tonn nitrozwiązków.

Poza tem

1000 tonn benzenu rezerwowano do fabrykacji gazów bojowych i centralitu.

Stosunek między ogólną ilością poszczególnych nitrozwiązków, wytworzonych w Niemczech przez czas wojny, widoczny jest z następującego zestawienia:

trotylu	50,76%
kwasu pikrynowego	13,70%
trójnitroanizolu	4,38%

heksylu	0,77%
siarczku sześcionitrodwufenylu	0,22%
tetrylu	0,06%
dwunitrobenzenu	27,10%
dwunitronaftalenu	1,66%
trójnitronaftalenu	1,54%

2) Ogólny brak węglowodorów aromatycznych, trudności fabrykacji dostatecznej ilości kwasów stężonych do ich nitracji (głównie kwasu siarkowego, dla którego brakło surowca — pirytów — i trzeba było stosować daleką od doskonałości metodę fabrykacji z gipsu), wywołały konieczność ograniczenia zużycia nitrozwiązków aromatycznych przez ich częściowe zastąpienie („rozcieńczenie") solami wybuchowemi:

saletrą amonową (do pocisków),
nadchloranem potasu (do min, bomb i t. p.).

Należy podkreślić, że nie zawahano się przed fabrykowaniem i stosowaniem tak silnie trujących związków jak dwunitrobenzen, trójnitroanizol i sześcionitrodwufenylamina. Usunięto wszelkie trudności, jakie tu powstawały i wreszcie opanowano pracę z punktu widzenia higjenicznego.

Ostatecznie wszystkie materjały wybuchowe kruszące używane przez armję niemiecką w czasie wojny, można podzielić na kilka grup:

1) czyste nitrozwiązki,
2) mieszaniny nitrozwiązków,
3) mieszaniny oparte na zasadzie topliwych nitrozwiązków z dodaniem saletry amonowej,
4) mieszaniny oparte na saletrze amonowej, topione,
5) mieszaniny oparte na saletrze amonowej, prasowane,
6) mieszaniny z glinem metalicznym (i saletrą amonową),
7) mieszaniny oparte na nadchloranie potasu.

Czyste nitrozwiązki były używane tylko na początku wojny. Od 1916 r. wprowadzone zostają mieszanki bądź kilku nitrozwiązków, bądź też nitrozwiązków z dodaniem soli wybuchowych. *Trotyl* czysty (t. zw. Fp02) pod postacią ładunków odlewanych lub prasowanych w tekturowych osłonkach zostaje zarezerwowany wyłącznie do pocisków morskich, do pocisków dział dalekonośnych oraz 42 cm. Do innych używano w mieszaninie z saletrą amonową i ewent. *dwunitrobenzenem* (t. zw. DiFp). Zazwyczaj przytem do pocisków wlewano naprzód sam dwunitrobenzen a na wierzch trotyl, co miało dwojaki cel:

Trotyl odgrywał tu rolę detonatora wtórnego a jednocześnie ułatwiał elaborację, izolując otoczenie od silnie trującego dwunitrobenzenu. Później dwunitrobenzen czysty zastąpiono mieszaniną z saletrą amonową.

Kwas pikrynowy (t. zw. Grf 88 t. j. Granatfüllung 88) również pod postacią odlewaną lub prasowaną w tekturowych cylindrach do pocisków 7,7 cm był pod koniec wojny z powodu jego niedostatecznej ilości zastąpiony mieszaniną z trójnitronaftalenem.

Czysty prasowany kwas pikrynowy poza tem stosowano do detonatorów wtórnych (zapalników) obok tetrylu. Ponadto był on nalewany do pewnych bomb lotniczych, wreszcie do ładunków saperskich narówni z trotylem. Do ostatniego celu zastąpiono go różnemi mieszankami wybuchowemi z saletrą amonową lub nadchloranem potasu.

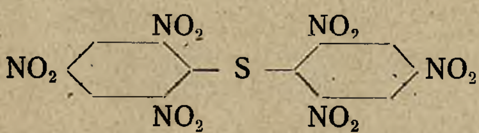
Trójnitroanizol (t. zw. An) był używany przez dłuższy czas do ładowania pocisków 21 cm przez nalewanie, lecz zaniechano tego ze względu na trudności elaboracyjne, spowodowane silnie toksycznem działaniem substancji. Pozostawiono go do napełniania min podwodnych oraz lądowych dużego kalibru. Przy końcu wojny mieszano go również z saletrą amonową.

Trójnitronaftalen (Trinal) i *Dwunitronaftalen* (Dinal) używano tylko w mieszankach z innemi nitrozwiązkami.

Mieszaniny nitrozwiązków stosowane w czasie wojny były bardzo różnorodne. Poza wspomnianą mieszanką 65% trotylu z 25% heksylu używany był również do niektórych bomb lotniczych i min morskich materjał wybuchowy, złożony z tych samych składników w ilości po 50%.

Bomby lotnicze napełniano też mieszaninami:
trotylu z siarczkiem sześcionitrodwufenylu (po 50%)

Substancja wybuchowa o wzorze:



trójnitroanizolu z heksylem (po 50%), trójnitroanizolu z siarczkiem sześcionitrodwufenylu (po 50%).

Do wszelkiego rodzaju pocisków stosowane były bardzo szeroko przez bezpośrednie nalewanie mieszanki trotylu z dwunitrobenzenem o różnej zawartości obu składników (zależnie od ilości rozporządzal-

nego materjału [1]). W mniejszym znacznie stopniu używano mieszaniny 65% trotylu z 35% trójnitronaftalenu.

Zaznaczyć należy, że nie wyrzeczono się użycia wielkiej ilości rozmaitych mieszanek nitrozwiązków, które wskutek niskiego punktu topliwości stwarzały obawy wypacania się i z tego właśnie względu w innych krajach (np. Francja) nie były wcale stosowane.

Mieszaniny nitrozwiązków z saletrą amonową stanowiły najważniejszy rodzaj materjałów kruszących, używanych w czasie wojny, szczególnie zaś w drugim jej okresie.

Na pierwsze miejsce od 1916 r. wysuwa się wspomniana już mieszanka 60% trotylu, wzgl. trotylu z dwunitrobenzenem, albo nawet samego dwunitrobenzenu z 40% saletry amonowej (t. zw. Fp 60/40 wzgl. DiFp 60/40).

Dalej stosowana była również mieszanka An 60/40 złożona z 60% trójnitroanizolu z 40% saletry amonowej (do pocisków, min lądowych i morskich); 50% trotylu, 25% heksylu i 25% saletry amonowej (do min morskich); mieszanka Di 65/35 złożona z 65% dwunitrobenzenu i 35% saletry amonowej (do pocisków).

Przy końcu wojny pociski ładowano również t. zw. materjałem wybuchowym Nr. 23, złożonym z 44% dwunitrobenzenu, 16% trójnitronaftalenu i 40% saletry amonowej.

Wszystkie te mieszaniny były ładowane przez bezpośrednie nalewanie do pocisków z wyjątkiem mieszanki Fp 60/40, którą początkowo używano w ładunkach tekturowych.

Obecność saletry amonowej powodowała oczywiście hygroskopijność mieszanek.

Ta ujemna własność nie była jednak bardzo silna, gdyż kryształy saletry, po stapianiu, zostawały otoczone nitrozwiązkiem. Celem lepszego zabezpieczenia materjału od wilgoci, ładunek wybuchowy w pocisku był jeszcze zalewany warstwą czystego trotylu.

W 1917 r. fabryka *Dynamit A. G. vormals A. Nobel* opatentowała mieszanki wybuchowe oparte na zasadzie *saletry amonowej*, która przez dodanie pewnych substancyj (saletra sodowa, dwucyjanodwuamid, mocznik i t. p.) dawała się topić w temp. ok. 110° i mogła być w tym stanie nalewana do pocisków.

Ponieważ okazało się w praktyce, że pociski takie detonują niezupełnie i z wielkim trudem, dodano do mieszanek przy stapianiu 20% trotylu, otrzymując ostatecznie mieszanki o składzie jak następuje:

---

[1]) Wspomniane DiFp.

	Materjał wybuchowy		
	Nr. 16	Nr. 22	(zaproponowany przez Kasta)
trójnitrotoluenu	20%	20%	
azotanu amonu	65	65	
azotanu sodu	10	12	
dwucyjanodwuamidu	5	—	
octanu sodu	—	5	

Obie mieszanki używane były w nabojach tekturowych do ładowania pocisków 21 cm, lecz wskutek trudnej detonacji i słabej skuteczności nie znalazły większego zastosowania.

Z pośród materjałów wybuchowych *amonosaletrzanych* nietopliwych, używanych do ładowania przez prasowanie, najważniejszym był *perdyt* zaproponowany przez *Kasta.* Miał on skład:

azotanu amonu	72%
nadchloranu potasu	10%
dwu i trójnitrotoluenu (przeważnie produkty odpadkowe)	15%
mączki drzewnej	3%

Mieszanka ta była używana od 1915 r. do napełniania min lądowych dużego i małego kalibru, oraz do ładunków saperskich (zamiast kwasu pikrynowego lub trotylu).

Pierwowzorem jej był materjał wybuchowy, używany w górnictwie — Donaryt, składający się z:

azotanu amonu	80%
trójnitrotoluenu	12%
nitrogliceryny	4%
mączki drzewnej	4%,

którego zastosowanie do celów wojskowych było wypróbowane w 1914 r., mianowicie do napełniania pewnych pocisków przez zaprasowanie. Okazało się jednak, że przy prasowaniu nitrogliceryna (niezżelatywowana) „wypacała się" i powodowała przedwczesną eksplozję pocisków w lufie dział. Ostatecznie zachowano tę mieszankę tylko do ładowania min, granatów ręcznych i do nabojów saperskich. Wkrótce z braku nitrogliceryny stało się koniecznem zastąpienie jej nadchloranem i w ten sposób otrzymano perdyt.

Ważną rolę odegrały również *amonosaletrzane* materjały wybuchowe, zawierające *glin* metaliczny — ogólnie zwane *amonalami.*

Na propozycję *Kasta* zastosowano ładunki amonalu prasowane w tekturowych osłonkach do pocisków dużego kalibru (15 i 21 cm) o składzie:

trójnitrotoluenu	20—30%
azotanu amonu	56—54%
glinu metalicznego	16—27%

Zmienny skład spowodowany był brakiem trotylu i glinu, których ilość wciąż zmniejszano. Wreszcie nadano mu przy końcu wojny skład:

trójnitrotoluenu	12%
azotanu amonu	72—80%
glinu metalicznego	16— 8%

Mieszanki oparte na zasadzie *nadchloranu potasu* używane były szeroko do napełniania min lądowych wszelkiego kalibru. Stosowano mieszankę nalewaną do min w stanie stopionym; składała się ona:

z nadchloranu potasu	56%
dwunitrobenzenu	32%
dwunitronaftalenu	12%

Silnie trujące działanie dwunitrobenzenu spowodowało ograniczenie użycia mieszanki.

Zaniechano więc elaboracji tym materjałem wybuchowym min małego kalibru i zarezerwowano wyłącznie do min większych, przy których potrzeba było mniej manipulacyj i można było naraz wlewać większe ilości materjału.

W czasie wojny udoskonalono miotacze min, zwiększając donośność pocisku z 1000 do 1500 m. W związku z tem stało się koniecznem zmniejszenie wrażliwości materjału wybuchowego na działanie mechaniczne przez zastąpienie części nadchloranu saletrą amonową i podniesienie zawartości nitrozwiązków. W ten sposób powstała mieszanka:

nadchloranu potasu	46%
azotanu amonu	10%
dwunitrobenzenu	62%
dwunitronaftalenu	12%

Mimo tej modyfikacji okazało się, że materjał wybuchowy jest zbyt wrażliwy na działania mechaniczne, szczególnie jeżeli chodzi o miny ciężkie i półciężkie i użycie jego znacznie ograniczono.

Z pośród materjałów kruszących nie objętych podanym wyżej opisem, do zanotowania są następujące:

T. zw. *Mischpulver*, służący do napełniania granatów ręcznych i składający się:

z prochu czarnego	83%
nadchloranu potasu	12%
glinu metalicznego	5%

Mieszanka zapalana była bezpośrednio od lontu. Zawierała ona początkowo chloran baru, który potem zastąpiono nadchloranem potasu.

Detonit (ta sama nazwa stosowana była do innego amonosaletrzanego materjału wybuchowego górniczego) używany do pocisków 2 cm armatek lotniczych, składał się z:

nitrocelulozy	ok. 70%
azotanu potasu	„ 20,5
glinu metal.	„ 6,5
siarki	„ 1,2
węgla	„ 1,8

Pociski ładowano przez zaprasowywanie mieszanki.

Chloranowe materjały wybuchowe, bardzo rozpowszechnione we Francji, w Niemczech do celów wojskowych zupełnie nie były używane, ze względu na swą wrażliwość na bodźce mechaniczne. Wszystek chloran szedł na potrzeby górnictwa oraz do ogni sztucznych.

Jako *materjał wybuchowy inicjujący* do celów wojskowych używany był piorunian rtęci, ładowany do spłonek w mieszaninie z chloranem potasu przy użyciu trotylu, jako ładunku wtórnego. Na czas wojny, do celów górniczych stosowane były natomiast spłonki z azotkiem ołowiu. Spłonki te, mające łuskę aluminjową, zawierały zazwyczaj azotek pokryty trójnitrorezorcynianem ołowiu, dla zabezpieczenia azotku od działania dwutlenku węgla, znajdującego się w powietrzu oraz dla ułatwienia wybuchu masy zapałowej w spłonce.

Trudności, które napotkał przemysł niemiecki przy fabrykacji materjałów wybuchowych miotających, były niemniejsze niż przy wyrobie materjałów kruszących. Brak surowców również zmusił do zmiany składu prochów, zależnie od rozporządzalnych produktów, co wobec trudności, jaką fabrykacja prochu stanowi sama przez się, stwarzało sytuację bardzo ciężką do opanowania.

Sprawa stanie się bardziej jasną po zapoznaniu się z rodzajami prochów, używanemi przez armję niemiecką przed wojną.

Prochy te możemy podzielić na następujące kategorje:

I) *prochy nitrocelulozowe,*

II) *prochy nitroglicerynowe* — które dalej dzielą się na:

1) prochy o dużej zawartości nitrogliceryny,

2) prochy o małej zawartości nitrogliceryny.

Między ostatniemi znajdujemy znów dwa rodzaje:

a) prochy z rozpuszczalnikiem lotnym,

b) prochy bez rozpuszczalnika lotnego.

Prochy nitrocelulozowe były używane do broni małokalibrowej i dział mniejszych. Karabinowe odznaczały się dużą postępowością, osiąganą przez żelatynizację powierzchniową roztworem alkoholowym kamfory lub centralitu oraz nadanie dużej żywości jądru drogą podniesienia do maksimum zawartości azotu w bawełnie strzelniczej i jak najdokładniejszego usunięcia rozpuszczalnika przez suszenie w próżni.

Proch armatni nitrocelulozowy używany był do dział polowych oraz dział 28 cm specjalnie przeznaczonych do obrony twierdz. Robiony z dwóch rodzajów bawełny strzelniczej: rozpuszczalnej i nierozpuszczalnej miał formę rurkową, dającą gwarancję większej postępowości.

Niejednokrotnie do ciasta prochowego dodawano pewną ilość centralitu albo kamfory, czasami też szczawian albo winian sodowy. Domieszki te miały na celu zmniejszenie płomienia wylotowego. Poza tem obecność centralitu lub kamfory ułatwiała fabrykację (obniżenie ciśnienia przy prasowaniu) i zmniejszała żywość prochu. Zmieniając więc ilość tych domieszek można było regulować własności balistyczne, spowodowane odchyleniami we własnościach bawełny strzelniczej.

Specjalny rodzaj prochu nitrocelulozowego, odznaczający się dużą żywością, był używany jako proch *ćwiczebny.* Proch był bardzo porowaty, co osiągano przez dodawanie do ciasta soli rozpuszczalnych w wodzie i następne wyługowanie ich wodą. Taki proch był używany nietylko jako ćwiczebny, lecz również zamiast prochu czarnego do zapłonników. Miało to na celu zmniejszenie dymu, wylatującego z lufy działa i w dużej części spowodowanego właśnie obecnością prochu czarnego.

Do dział większego kalibru i haubic używany był proch żywszy o większej energji — *proch nitroglicerynowy,* zawierający *40% nitrogliceryny* i bawełnę strzelniczą rozpuszczalną o względnie wysokiej zawartości azotu.

Proch ten był robiony z domieszką 1% centralitu odgrywającego rolę żelatynizatora i stabilizatora. Używanie żelatynizatora ciekłego i lotnego (acetonu) było stosowane tylko w wypadku bawełny strzelniczej trudno żelatynującej.

Prochy miały formę albo kwadratowych płytek wzgl. kostek (WP = Würfelpulver) albo pierścieni (Ringpulver). Pierwsze były stosowane do dział 10 i 15 cm, drugie do większych — 21 i 28 cm.

Forma pierścieniowa dawała gwarancję bardziej regularnego palenia się prochu, co przy większych ładunkach (działa większego kalibru) odgrywało dużą rolę.

Ogromne znaczenie w historji rozwoju fabrykacji prochów miało zastosowanie przez marynarkę niemiecką prochów o *niskiej zawartości nitrogliceryny*. Prochy te były przyjęte na skutek doświadczeń dokonanych jeszcze na długo przed wojną. Doświadczenia te wykazały, że prochy nitroglicerynowe przy zastosowaniu w działach dużego kalibru, posiadają znaczną przewagę nad prochami nitrocelulozowemi, dając przy jednakowych ciśnieniach znacznie większą prędkość pocisku. Spowodowane to było większą postępowością prochów nitroglicerynowych, co znów tłumaczono w sposób następujący.

Dla usunięcia rozpuszczalnika z prochów nitrocelulozowych potrzebne jest moczenie prochów w wodzie tem energiczniejsze, im większe są wymiary prochu. Moczenie szczególnie w wysokiej temperaturze powoduje częściową koagulację koloidu prochowego na powierzchni prochu. Wskutek tego powierzchnia jest mniej zżelatynowana niż jądro, a co zatem idzie i żywsza. Otrzymujemy więc efekt wprost przeciwny, niż to jest wymagane dla prochu z punktu widzenia jego postępowości, która osiągana jest w pewnych wypadkach właśnie przez silniejszą żelatynizację powierzchni.

Przed 1912 r. prochy o niskiej zawartości nitrogliceryny—25—30%, a nawet mniej — nie posiadały jeszcze wspomnianych walorów: były one przyrządzane z dodaniem żelatynizatora lotnego — acetonu, który uchodził z wielkim trudem dopiero po dłuższem suszeniu.

W r. 1912 rozpoczęto fabrykację rurkowego prochu nowego typu, t. zw. R. P. C/12, którego przyrządzenie polegało na ugnieceniu i zwalcowaniu na gorąco masy złożonej z niskonitrowanej bawełny strzelniczej (11,7% azotu), 25% nitrogliceryny i 4—8% centralitu. Zwalcowana masa była następnie, również na gorąco, poddawana prasowaniu. Bawełna strzelnicza używana do tego celu składała się zwykle z mieszaniny bawełny strzelniczej o 11% z bardziej nitrowa-

ną, która pozostając nieżelatynowaną nadawała większą żywość prochowi.

Ta fabrykacja, nie wymagająca prawie zupełnie suszenia prochu wskutek całkowitego pominięcia rozpuszczalników lotnych, stanowi ideał z punktu widzenia technologicznego: wszystko co jest dodawane do masy pozostaje przez cały czas fabrykacji i stanowi część składową prochu. Duża zawartość żelatynizatora stałego — centralitu odgrywała poza tem rolę stabilizatora. Użycie dwufenyloaminy stało się zbędnem, nawet szkodliwem ze względu na możliwość tworzenia z nitrogliceryną produktów smolistych, ulegających łatwemu rozkładowi.

Prochy RPC/12 posiadają względnie niską temperaturę spalania i dzięki temu słabe działanie erozyjne, czem znów różnią się od prochów o dużej zawartości nitrogliceryny.

Ten typ prochu został przyjęty dla dział morskich wszelkiego kalibru oraz dla dział lądowych 42 cm i odegrał ogromną rolę podczas wojny. Normalna fabrykacja wszystkich opisanych rodzajów prochu stała się w czasie wojny utrudniona, wobec konieczności prawie wyłącznego stosowania celulozy drzewnej, używanej przedtem tylko tytułem próby, niedostatecznej ilości gliceryny, braku alkoholu, a wreszcie wspomnianego już braku kwasów potrzebnych do nitracji celulozy i gliceryny.

Prochy karabinowe wojenne nie różniły się bardzo od przedwojennych. Żelatynizacja powierzchniowa była dokonywana tylko centralitem, z powodu braku kamfory, której jeszcze nie umiano zrobić syntetycznie na skalę fabryczną.

Prochy nitrocelulozowe używane do *dział* polowych uległy początkowo modyfikacji, polegającej na zastąpieniu pewnej ilości bawełny strzelniczej nitrozwiązkami aromatycznemi, co poza oszczędnością na bawełnie strzelniczej pociągało za sobą również oszczędność rozpuszczalnika (alkoholu). Modyfikacja ta jednak była zarzucona z chwilą, gdy wprowadzono *szeroko proch amonowy* i zastosowano ługi sulfitowe celulozy do fabrykacji alkoholu.

Niektóre prochy nitrocelulozowe były użyte do dział większego kalibru, szczególnie haubic 10 cm zamiast prochów nitroglicerynowych. Podyktowane to zostało brakiem gliceryny.

Prochy nitroglicerynowe przeszły również okres zastąpienia części nitrogliceryny nitrozwiązkami aromatycznemi. Wprowadzenie w życie otrzymywania gliceryny syntetycznej przez fermentację cukru, zapobiegło częściowo jej brakowi i pozwoliło na zaniechanie fabrykacji nowego prochu, nie odznaczającego się żadnemi zaletami.

Prochy o małej zawartości nitrogliceryny typu RP.C/12, nie potrzebujące do swej fabrykacji długotrwałego suszenia i lotnego rozpuszczalnika, pozwalały na szybką produkcję większych ilości bez dużego trudu. Również i tutaj dla zaoszczędzenia gliceryny zastępowano nitroglicerynę częściowo trotylem o niskim punkcie topliwości. Podniesienie produkcji gliceryny (fermentacyjnej) umożliwiło powrót do prochu normalnego.

Dla dział małego kalibru robiono proch nitroglicerynowy z rozpuszczalnikiem lotnym (acetonem), gdyż tutaj, wobec małej grubości ścianek rurek prochowych, suszenie było mniej uciążliwe.

Rozwój nowego rodzaju broni — miotaczy min, który zaznaczył się w czasie wojny, spowodował utworzenie nowego prochu nadającego się do tej broni. Proch ten odznaczał się wielką żywością. Używano albo prochu ćwiczebnego, albo specjalnie przyrządzonego nitroglicerynowego.

Brak celulozy i kwasów do jej nitracji (głównie kwasu siarkowego) spowodował zastąpienie częściowe prochu nitrocelulozowego do dział polowych *prochem amonowym.*

Ten proch, składający się z saletry i 15% węgla drzewnego, był znany już od 1890 r. i używany wówczas w Austrji do dział morskich.

Zalety: niska temperatura spalania, mała erozyjność i mała płomienność nie wystarczały jednak wobec wielkich wad: dużej hygroskopijności i nieregularnych własności balistycznych, które też spowodowały zaniechanie dalszego użycia tego prochu. Dopiero w czasie wojny, dzięki badaniom B e r g m a n n'a, udało się opanować trudności balistyczne przez zastąpienie tylko części ładunku prochu nitrocelulozowego prochem amonowym.

Proch amonowy był szeroko stosowany głównie do dział 77 mm, przyczem stanowił $^1/_3$, a później ½ całego ładunku prochowego. Również w działach 15 cm $^1/_3$ ładunku często zastępowano prochem amonowym. Celem zabezpieczenia go od wilgoci niejednokrotnie prasowany proch amonowy umieszczano w hermetycznie zamkniętych cylindrach, zrobionych z prochu nitroglicerynowego.